

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



TRABAJO FIN DE GRADO

Desarrollo de una “toolbox” para condicionar el comportamiento de peces eléctricos, basado en la codificación de las señales eléctricas emitidas por éste y su comportamiento.

Víctor Hugo García García

JULIO 2014

Palabras clave

Electro-comunicación, electro-recepción, electro-localización, procesamiento de información temporal, *Gnathonemus Petersii*, setup modular apilable, tiempo real, Advanced Dynamic Clamp, circuito impreso, dipolos eléctricos, circuito analógico, DAQ.

Resumen

El *Gnathonemus petersii*, también conocido como Pez Elefante, tiene unas propiedades únicas para el estudio científico dentro del campo del procesamiento de la información dinámica. Esta especie posee la capacidad de situarse en entornos de reducida visibilidad y comunicarse gracias a mecanismos de emisión y recepción de impulsos eléctricos.

En el Laboratorio del Grupo de Neurocomputación Biológica se ha desarrollado una plataforma que permite analizar estos impulsos e incluso interactuar con los peces elefante, procesando la información que emiten para realizar una estimulación en tiempo real en lo que se denomina lazo cerrado. Esto supone por tanto una abundante fuente de información para el estudio del procesamiento dinámico de la información en sistemas naturales de computación.

Este sistema se compone del propio acuario, donde se colocan los dipolos sensibles a los impulsos del pez, un setup de adquisición de datos encargado de realizar una adecuación de la señal recibida, un DAQ (dispositivo de adquisición) para las conversiones analógico-digital y digital-analógico, el software Advanced Dynamic Clamp/RTBiomanager capaz de procesar y estimular en tiempo real, y un pez eléctrico artificial utilizado como estimulador.

A lo largo de esta memoria se explica cómo se ha diseñado y construido el setup de adquisición, convirtiéndolo a tecnología de circuito impreso y añadiéndole diversas mejoras tanto en funcionalidad como en robustez. Estas mejoras incluyen la separación de las funciones realizadas por el circuito en placas-módulo apilables o la rápida configuración del setup mediante jumpers adaptable a cualquier tipo de acuarios y cualquier número de dipolos.

Tras la construcción de un primer setup adaptado al acuario utilizado hasta ahora, se ha construido un segundo sistema acondicionador, conectado también a la tarjeta de adquisición y a un segundo acuario para demostrar la adaptabilidad y versatilidad de la plataforma, ya que este segundo acuario presenta diferentes características y requiere una configuración distinta.

Una vez construido también el pez artificial, se consigue un sistema de comunicación con todas las herramientas hardware necesarias para crear un medio de comunicación entre dos individuos en distintas peceras pero con un “Man in the Middle”, que permita monitorizar y/o modificar los mensajes que fluyen por ADCLAMP/RTBiomanager, abriendo un gran abanico de posibilidades en cuanto a experimentos relacionados con el procesamiento de información en sistemas naturales.

Keywords

Electro-communication, electro-reception, electro-location, temporal information processing, *Gnathonemus Petersii*, modular stackable setup, Real Time, Advanced Dynamic Clamp, Printed Circuit Board, electric dipoles, analog circuit, DAQ.

Abstract

The *Gnathonemus petersii*, also known as “Elephantnose fish”, has unique properties for the scientific study in the dynamic information processing field. This species has the ability to orient themselves in reduced visibility environments and also communicate thanks to electrical impulse emitting and receiving mechanisms.

In the Biological Neurocomputation group Laboratory a platform has been designed that allows to analyze these impulses and even interact with the elephantnose fish themselves, processing the information that they emit in order to make a real time simulation, which is also known as closed loop. This makes for a truly abundant source of data for the study of dynamic signal processing in biological computing systems.

This system is composed of the aquarium where the fish impulse sensitive dipoles are placed, a data acquisition setup in charge of adjusting the received signal, a DAQ (data acquisition system) for the digital-analog and analog-digital conversions, the Advanced Dynamic Clamp/RTBiomanager software that is capable of processing and stimulating in real time, and an artificial electric fish used as an stimulator.

Throughout this document the construction and design of the acquisition setup is explained, converting it to printed circuit technology and adding several improvements in functionality as well as sturdiness. These improvements include the separation of the functions performed by the circuit in stackable modular PCBs and the quick setup configuration via jumpers that is easily adaptable to other kinds of aquariums and dipole numbers.

After the construction of a setup adapted to the aquarium that has been used until now, a second conditioning system has been built. This new setup was used to monitor a second aquarium, and the system had to be re-adapted for the new configuration. Once the artificial fish was also built, a full communications system is obtained, with all the hardware tools that are necessary to create

a mean of communication between two individuals in different aquariums but with a "Man in the Middle" that allows to monitor and/or modify the messages that flow through the ADCLAMP/RTBiomanager software, offering a great range of possibilities concerning natural computing system information processing related experiments.

Agradecimientos

Me gustaría en primer lugar mostrar mi gratitud hacia mi tutor Francisco de Borja por todo el esfuerzo y las horas invertidas en guiarme y aconsejarme durante todos estos meses.

Muchas gracias también a Pablo y en general a todas aquellas personas que hacen del GNB un segundo hogar, en especial a Carlos, por su permanente predisposición a ayudar y su buen humor, y a Ana, por llenar de alegría estas cuatro paredes entre las que escribo ahora mismo.

Una mención especial quiero hacer a Ángel, cuya colaboración nos ha mantenido a nosotros a flote, y a los peces hundidos; y no al revés.

También quiero mandar un abrazo a todos mis compañeros de promoción por crear un grupo tan agradable y colaborador. Sin la ayuda de todos no seríamos ni la mitad de lo que somos.

Diego, Marta, Alex, Edu, Paula, Lucas, Manu y por supuesto Ángel (nuestro eterno delegado) son una pequeña selección de todos los nombres que ya tienen un pequeño rincón en mi memoria, mi más sincero agradecimiento por hacer de esta escalada una mera excursión.

Y por ultimo, pero no por ello menos importante, a mi familia por su eterno apoyo incondicional.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1- Introducción.....	1
1.1 Motivación.....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Organización de la memoria.....	5
2- Estado del arte.....	7
2.1 El fenómeno de la electro-recepción y la electro-comunicación aplicado a los peces eléctricos.....	7
2.1.1 Electro-recepción activa y Electro-localización.....	9
2.1.2 Electrocomunicación.....	10
2.2 El problema de la precisión temporal y la solución mediante software capaz de trabajar en Real Time.....	11
2.3 La electrónica de adquisición de datos para la caracterización y procesamiento en tiempo real de las señales emitidas por el <i>Gnathonemus Petersii</i>	13
2.4 Procesado de la información presente en las señales emitidas por el Pez Elefante.....	14
3- Diseño, Construcción y validación de un setup modular de adquisición de datos.....	17
3.1 Objetivo.....	17
3.2 Diseño.....	17
3.3 Modularidad.....	24
3.4 Construcción.....	24
3.5 Validación e Integración.....	26
4- Diseño e integración de un pez artificial.....	29
4.1 Verificación en entorno real.....	30
5- Construcción de un segundo setup modular de adquisición de datos y su integración en un acuario con distinta configuración.....	33
5.1 Diseño y montaje del sistema.....	33
5.2 Pruebas y comprobaciones.....	36
6- Comunicación unidireccional monitorizada entre peces de diferentes acuarios.....	39
6.1 Consideraciones acerca del Tiempo Real.....	39
7- Conclusiones y trabajo futuro.....	50
- Referencias.....	I
- Presupuesto.....	V
- Anexos.....	VII
A) Esquemáticos.....	VII
B) Funcionalidad implementada: Selección entre distintos voltajes de referencia.....	IX
Ejemplos de utilización.....	X
C) Diseño de una pieza en 3D para utilizarla como soporte de la plataforma de amplificación.....	XI
D) Cables y conexión de los dipolos a los conectores tipo MOLEX KK y al acuario.....	XIV
E) Lista de componentes eléctricos.....	XVI

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Comparativa entre los circuitos. A la izquierda el prototipo previo, con tecnología wire-wrapping y a la derecha el nuevo setup, en tecnología de circuito impreso.....	3
Figura 2: Desglose de los distintos peces eléctricos. Resaltado en rojo el género <i>Mormyrid</i> <i>Gnathonemus</i> al que pertenecen los <i>Gnathonemus Petersii</i>	8
Figura 3: Distintos modelos de pulso según la especie.....	9
Figura 4: Localización del pedúnculo caudal.....	9
Figura 5: Electrolocalización.....	10
Figura 6: El pulso del <i>Gnathonemus petersii</i>	11
Figura 7: Captura de la interfaz del software ADCLAMP/RTBiomanager durante la detección de palabras y estimulación en tiempo real[12].....	13
Figura 8: El antiguo circuito de amplificación construido utilizando wire-wrapping.....	14
Figura 9: Histogramas según IPI(Inter-Pulse Interval) obtenidos en distintas pruebas con un <i>Gnathonemus petersii</i>	15
Figura 10: Esquemático del circuito amplificador utilizado como referencia.....	18
Figura 11: Diseño inicial del circuito sobre PCB.....	19
Figura 12: Esquema orientativo sobre la división en módulos sobre el esquemático.....	21
Figura 13: Diseño final de la PCB. Placa 1.....	23
Figura 14: Diseño final de la PCB. Placa 2.....	23
Figura 15: Uno de los módulos construidos. Vista lateral y posterior. Módulo apilable.....	24
Figura 16: Primeras placas, versión inicial. Módulo base a la izquierda y módulo apilable a la derecha.....	25
Figura 17: Últimas placas soldadas, versión final, módulo apilable.....	25
Figura 18: Últimas placas soldadas, versión final, módulo base.....	25
Figura 19: Primera placa construida completa y funcional.....	26
Figura 20: Vista lateral del setup, con los soportes de PLA instalados.....	27
Figura 21: Vista Frontal-Superior del setup con los soportes de PLA instalados. Además se detallan las partes más características del circuito.....	27
Figura 22: Pez artificial y transformador de aislamiento.....	29
Figura 23: Detalle a escala del cambio de tamaño del pez artificial.....	30
Figura 24: Detalle para la emisión de una onda sinusoidal (500Hz) registrada por un dipolo simple.....	31
Figura 25: Misma señal que en la figura anterior, pero tomada la salida sumada y elevada al cuadrado por el AD633.....	32
Figura 26: Verificación del funcionamiento del pez artificial.	32
Figura 27: Aumento sobre un impulso. La función recibida es muy similar a la emitida, con un ligero retardo (Ver sección 6.1).....	32
Figura 28: Distribución de los dipolos dentro de la nueva pecera frente a la previa.....	33
Figura 29: Distribución de los dipolos en la segunda pecera (Foto).....	34
Figura 30: Esquema simplificado sobre el sistema.....	35
Figura 31: Adaptación final de la pecera, con las coberturas hechas a base de cartulina negra.....	35
Figura 32: Ruido introducido en la pecera por los componentes eléctricos.....	36
Figura 33: Gráfica con el CMRR obtenida del Datasheet del chip correspondiente al amplificador TL082.....	37
Figura 34: Conexión de la masa del circuito directamente al agua del acuario para eliminar el ruido producido por los componentes eléctricos.....	38
Figura 35: Captura para el cálculo del retardo introducido por el sistema completo. Muestreo de la señal realizado a 15KHz.....	40
Figura 36: Esquema simplificado del experimento utilizando estimulación artificial.	41

Figura 37: Esquema simplificado sobre el sistema cerrado completo, utilizando estimulación natural.....	42
Figura 38: Interfaz de ADCLamp/RTBiomanager durante una estimulación con pulsos de <i>Gnathonemus petersii</i> sobre el acuario adaptado nuevo.....	44
Figura 39: Estimulación artificial. Resultados obtenidos utilizando un pez artificial pequeño de 12.5cm.....	45
Figura 40: Estimulación artificial. Resultados obtenidos utilizando un pez artificial emisor grande de 18.5cm.....	45
Figura 41: Estimulación natural: Resultados obtenidos utilizando un pez artificial pequeño de 12.5cm.....	46
Figura 42: Estimulación natural: Resultados obtenidos utilizando un pez artificial grande de 18.5cm.....	46
Figura 43: Estimulación natural bidireccional monitorizada.....	52
Figura 44: Captura del esquemático en KiCAD. Placa 1, Módulo apilable.....	VII
Figura 45: Captura del esquemático en KiCAD. Placa 2, Módulo Base.....	VIII
Figura 46: Detalle de los jumpers en el módulo apilable.....	IX
Figura 47: Detalle de los soportes verticales de PLA en el setup número 2.....	XI
Figura 48: Soporte vertical visto en FreeCAD. Pieza frontal.....	XII
Figura 49: Soporte vertical visto en FreeCAD. Pieza lateral.....	XII
Figura 50: Impresora 3D.....	XII
Figura 51: Setup utilizado para el acuario número 1. Se pueden ver los soportes laterales y frontal.....	XIII
Figura 52: Dipolo fijado sobre la pared del acuario utilizando pegamento termofusible.....	XIV
Figura 53: Detalle de la conexión de los conectores MOLEX.....	XIV
Figura 54: Colocación de los dipolos sobre las paredes interiores del acuario.....	XV

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Descripción de los Jumpers de configuración.....	IX
Tabla 2: Ejemplo de utilización 1.....	X
Tabla 3: Ejemplo de utilización 2, configuración de la placa de la cual se quiera obtener el voltaje de referencia como V_a	X
Tabla 4: Ejemplo de utilización 2, configuración del resto de placas.....	X

Glosario

IPI:	Inter-Pulses Interval o Intervalo entre pulsos.
Hard Real Time	Se dice que un sistema operativo opera en Hard Real Time cuando la validez de un resultado no se mide solamente en que sea correcto, sino que también se ha realizado en un determinado intervalo de tiempo.
Open Source	Es la expresión con la que se conoce al software distribuido o desarrollado libremente. Gira entorno a la idea de que al compartir el código y permitir que cualquiera pueda mejorarlo, el resultado de la colaboración masiva es de una calidad superior al del software cerrado.
DSP	Digital Signal Processor o Procesador digital de señales. Es un sistema basado en un microprocesador optimizado para realizar operaciones numéricas a muy alta velocidad.
DAQ	Data acquisition system. Sistema encargado de recibir señales analógicas y convertirlas en datos que sean interpretables por un sistema informático, y viceversa.
Entropía	Mide la incertidumbre de una fuente de información.
PCB	Printed Circuit Board o circuito impreso.
Footprint	La huella que representa a los componentes utilizados en el diseño sobre una PCB.
Latencia	Medida del tiempo que tarda en emitir una respuesta un sistema desde que es estimulado.
SNR	Es la relación de proporción existente entre la señal que se transmite y la señal de ruido interferente.

1 Introducción

En las fangosas y oscuras aguas de los fondos de los ríos entre Nigeria y el Congo, habita el *Gnathonemus petersii*, también conocido como pez elefante.

Los peces elefante, prácticamente ciegos, sobreviven en este medio de reducida visibilidad gracias a su capacidad para producir, recibir e interpretar pequeños impulsos eléctricos que utilizan para la búsqueda de alimento, el reconocimiento del medio y la navegación así como la comunicación con otros miembros de su especie, con los que intercambian protocolos de cortejo o defensas territoriales, aunque todavía es desconocido cómo se realizan exactamente estos procesos de comunicación.



En la cola del pez (ver fig. 4) se sitúa el órgano encargado de producir estos impulsos eléctricos, en forma de pequeñas descargas. Este órgano se compone de miles de células eléctricas que se sitúan sobre la piel. Poseen además electro-receptores situados por prácticamente todo el cuerpo y éstos les permiten recibir los impulsos generados por otros peces, o los suyos propios emitidos con la función de comunicarse o detectar objetos u otros animales.

Por tanto este órgano eléctrico es vital para esta especie, dado que sirve para orientación y para la búsqueda de alimento pero también para propósitos sociales. Estos incluyen la localización de sus congéneres, la ubicación de su posición jerárquica en el grupo y la obtención de pareja [1].

Los objetos que están dentro del campo eléctrico que generan estos peces suelen poseer una conductividad distinta a la del medio, y por tanto son detectados al alterar la corriente inducida a los órganos electro-receptores. El pez detecta estos cambios y la información que éstos llevan y a partir de ellos genera una imagen eléctrica del entorno que le rodea, el llamado efecto de electro-localización (ver figura 5) [2] que es nada más que un ejemplo en la naturaleza de procesamiento dinámico de la información. Este fenómeno presenta unas características únicas, dado que

Introducción

permite obtener de manera no invasiva señales referidas a la electro-comunicación y electro-localización, que están directamente relacionadas con los procesos que suceden en el sistema nervioso del individuo.

1.1 Motivación

Los experimentos realizados en los peces débilmente eléctricos enfocados al estudio de su comportamiento han demostrado que la respuesta de los individuos es diferente dependiendo del tipo de estímulo que reciben. Estímulos grabados asociados a procesos de ataque, peces en estado de reposo o secuencias aleatorias han producido respuestas distintas en estos peces. La precisión temporal de pulsos generados en respuesta a los estímulos es alta, y dada la conexión con los procesos de comunicación, supone un punto muy importante a tener en cuenta de cara al diseño de un sistema que se utilice para estudiarlos [22][31][32].

Aunque el estudio de la codificación de las señales de los peces eléctricos tiene varias aplicaciones más allá de la mera comprensión de la comunicación entre individuos. La investigación básica acerca del procesamiento de la información que realizan puede resultar una gran fuente de información.

Uno de los usos que se le está dando actualmente es utilizar a los peces como detectores de la calidad del agua, ya que sus patrones de emisión de impulsos cambian en presencia de contaminantes[3]. Otro uso también muy interesante tecnológicamente hablando es el desarrollo de robots submarinos que realicen un procesamiento de información dinámico y lo utilicen para navegar o la búsqueda de animales u objetos del entorno. Este método de búsqueda es muy interesante ya que se puede utilizar en entornos donde otros métodos de búsqueda son inviables, como las aguas turbias [4][18][19][20].

El pulso que generan los peces elefante es del orden de las décimas de milisegundo (aproximadamente 0.8ms, ver figura 35). Para conseguir una detección correcta de estos eventos que permita realizar una estimulación en respuesta adecuada se necesita una gran precisión tanto para detectar como para estimular. Esta es la razón por la que se utilizan herramientas de tiempo real en este sistema.

En este Trabajo de Fin de Grado se pretende fabricar un entorno que permita analizar la comunicación entre dos peces reales y con la posibilidad de modificar y filtrar los mensajes que se envían entre ellos, todo ello en tiempo real. De esta manera se podrán realizar medidas de un entorno natural donde la comunicación se realice entre dos seres vivos a través de un sistema lo más inocuo posible y que además monitorice toda la comunicación.

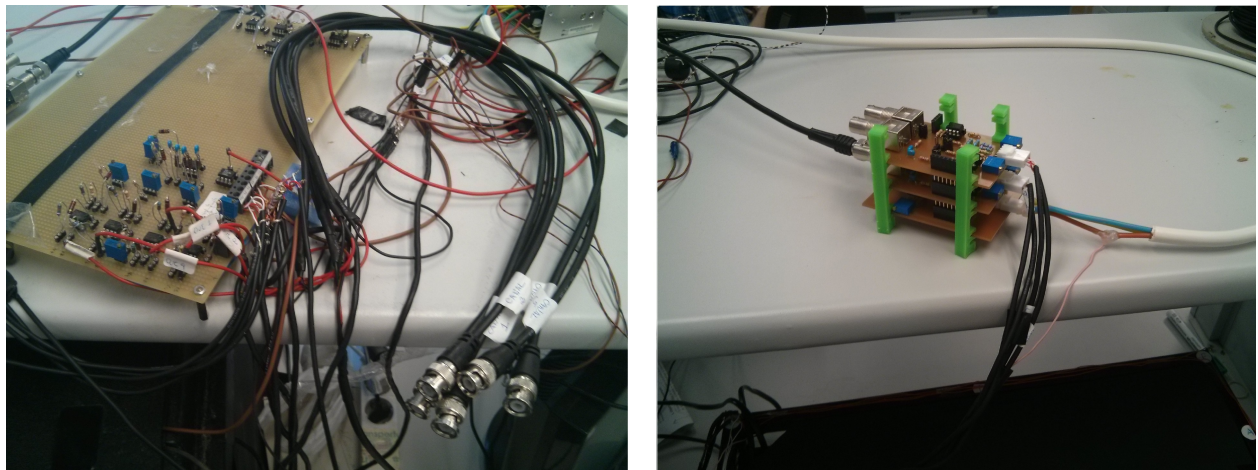


Figura 1: Comparativa entre los circuitos. A la izquierda el prototipo previo, con tecnología wire-wrapping y a la derecha el nuevo setup, en tecnología de circuito impreso.

Para llevar a cabo esta monitorización es necesario utilizar una plataforma robusta y fiable, que introduzca en el sistema la menor incertidumbre posible. El prototipo existente en el GNB, habiendo superado ampliamente la fase de prueba y habiendo validado las modificaciones en este prototipo, está en el momento perfecto para dar el salto a un setup que además de ser funcional proporcione robustez, versatilidad y modularidad, sin llegar a tener la rigidez de diseño que pudiese tener una placa comercial. Este setup de adquisición de datos tuvo por tanto como directriz de diseño ser capaz de adaptarse a cualquier tipo de acuario, experimento o con cualquier número de dipolos. En resumen, se busca un balance entre el prototipo y un sistema comercial o profesional.

1.2 Objetivos

Para mayor claridad, se van a numerar los objetivos buscados en este TFG de la siguiente manera:

- Objetivo N°1: Esta es la meta principal y consiste en la creación de un setup modular y versátil que permita la adquisición de datos de manera fiable y robusta, dando así mayor

Introducción

validez a los resultados que se obtengan en las investigaciones que se realicen utilizándolo. Las principales características que han de definir este setup son las siguientes:

- El cambio de tecnología de fabricación utilizada. El uso de wire-wrapping no resulta resistente al paso de los años y es necesario un salto hacia la tecnología de circuito impreso, que proporciona la seguridad adecuada.
- Un diseño abierto, accesible para cualquier interesado, modificable y flexible, de manera que sea aplicable a gran cantidad de escenarios posibles. Además, se realizará sobre una plataforma también libre para apoyar la filosofía Open Source.
- Modularidad. Relacionado con el punto anterior, se busca la modularidad en el diseño por varios motivos. El fundamental es la flexibilidad o versatilidad que permite que la misma plataforma se pueda construir en casos con acuarios en los que se necesiten un número de dipolos muy distintos.

Como motivo secundario, un sistema modular provee de mayor tolerancia a fallos, dado que éstos son rápidamente localizables y reparables.

- Objetivo N°2: Diseño y validación de un pez eléctrico artificial en un entorno real. Este pez artificial servirá para simular los campos eléctricos emitidos por los peces.
- Objetivo N°3: Una vez diseñada, construida y verificada la primera plataforma de adquisición, se propone la creación de una segunda plataforma con los mismos diseños que la primera de cara a su utilización en un segundo acuario. Este segundo acuario se adaptará desde cero, y se utilizará un número de dipolos y distribución de los mismos distinta. De esta manera la configuración de esta segunda plataforma de adquisición será también distinta y se podrá validar el setup en un entorno distinto, confirmando la propiedad de versatilidad y flexibilidad que se buscaba.
- Objetivo N°4: Tras validar el funcionamiento de ambos setups de adquisición, se busca la conexión de ambos acuarios de tal manera que se realice una comunicación unidireccional monitorizada que valide experimentalmente el funcionamiento simultáneo de ambos setups.
- Objetivo N°5: Conexión bidireccional de acuarios. En aras de dejar abierta una gran puerta a la investigación del procesamiento de información dinámica en sistemas naturales como son estos animales, se quiere conectar ambos acuarios de tal manera que

la comunicación sea bidireccional y todos los impulsos sean registrados para ser más tarde procesados.

1.3 Organización de la memoria

La memoria consta de los siguientes capítulos:

1. Introducción.
2. Estado del arte. En esta sección se abordan brevemente los principales temas e investigaciones realizadas sobre las que se basa el proyecto.
3. Diseño, Construcción y validación de un setup modular de adquisición de datos. En esta sección se detalla cómo se ha realizado todo el proceso de diseño, construcción, validación e integración final de la placa, incluyendo los pasos intermedios y decisiones tomadas para sortear los problemas surgidos a lo largo de éste.
4. Diseño e Integración de un pez artificial. Se estudiará el modelo del campo eléctrico emitido por los peces elefante y se aplicarán los resultados para construir un pez artificial más aproximado al caso real. Una vez construido, se procederá a evaluar su comportamiento en la misma pecera.
5. Construcción de un segundo setup modular de adquisición de datos y su integración en un acuario con distinta configuración. En este capítulo se trata la construcción del segundo setup, la adaptación de un segundo acuario y la validación del conjunto, así como la solución de los problemas más importantes surgidos en el proceso.
6. Comunicación unidireccional monitorizada entre peces de distintos acuarios. En esta sección se conectarán ambos acuarios con el objetivo de confirmar la validez del sistema completo para labores de investigación.
7. Conclusiones y trabajo futuro. En este último capítulo se resume el resultado del trabajo, con una lista de los objetivos alcanzados. También se comenta cuáles son las pautas naturales a seguir en el proyecto, así como las conclusiones extraídas del trabajo realizado.

2 Estado del arte

Dada la naturaleza multidisciplinar de este trabajo, el estado del arte engloba diversas áreas de trabajo generalmente no relacionadas. En esta sección se va a hacer una panorámica para situar al lector en los siguientes campos:

- El fenómeno de la electro-recepción y la electro-comunicación aplicado a los peces eléctricos, más concretamente al pez elefante.
- El problema de la precisión temporal y la solución mediante software capaz de trabajar en Real Time, ya que el setup realizado será la entrada de este sistema.
- La electrónica de adquisición de datos para la caracterización y procesamiento en tiempo real de las señales emitidas por el *Gnathonemus petersii*.

2.1 El fenómeno de la electro-recepción y la electro-comunicación aplicado a los peces eléctricos

La capacidad de ciertos animales para detectar y utilizar en su favor los campos eléctricos ha sido durante siglos un foco de interés para biólogos y científicos [1]. En la naturaleza este sentido eléctrico no ha aparecido de manera esporádica, sino que existe en numerosos casos y, lo que es más interesante, a través de distintas ramas evolutivas. Esto da lugar a pensar que la electro-recepción es una capacidad muy beneficiosa y por tanto, interesante de cara a un estudio científico.

Debido a las propiedades conductoras que posee el agua frente al aire, la mayor parte de las especies con células electro-receptoras son acuáticas. Se pueden dividir en dos grandes grupos.

-Los fuertemente eléctricos (como las anguilas eléctricas), capaces de generar descargas de más de 450 voltios y que utilizan esta habilidad para la depredación.

-Los débilmente eléctricos, que utilizan esta capacidad para la electro-comunicación y la electro-localización. Este tipo de peces son ideales para el estudio científico gracias a que por su naturaleza es fácil implementar interfaces de comunicación bidireccional.

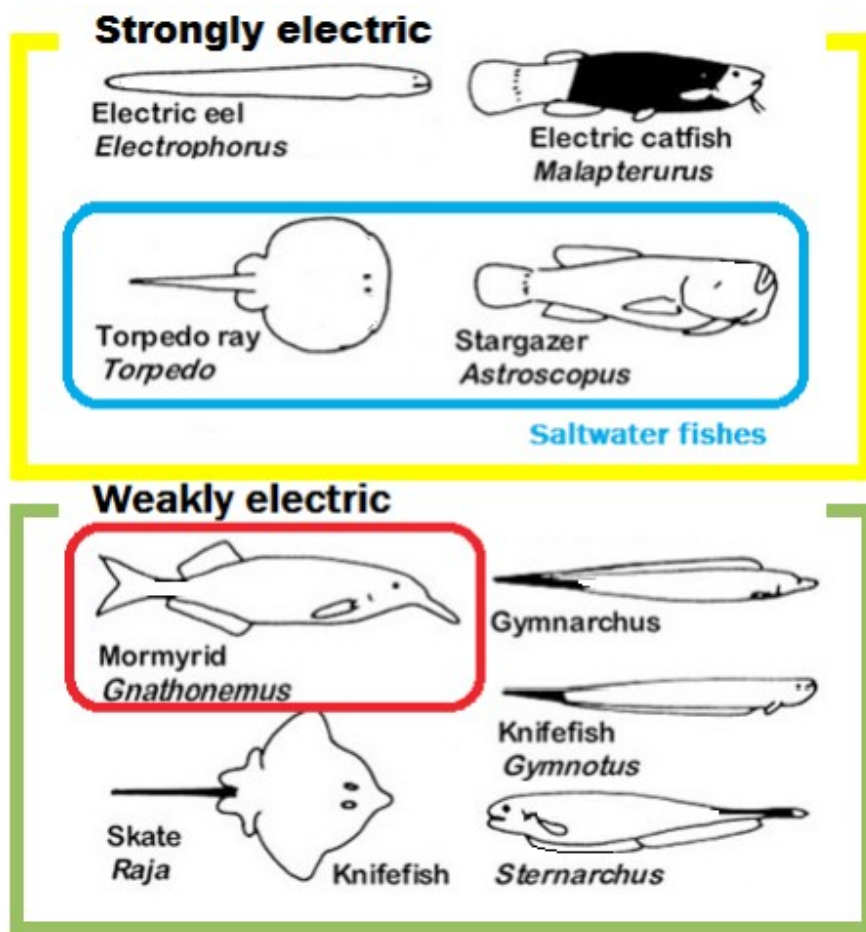


Figura 2: Desglose de los distintos peces eléctricos. Resaltado en rojo el género *Mormyrid Gnathonemus* al que pertenecen los *Gnathonemus Petersii*.

Además, existe un tercer grupo más extenso: los electro-receptores, que son incapaces de generar campos eléctricos pero pueden utilizar este sentido para actividades como la depredación. La actividad nerviosa y muscular de las presas genera sutiles cambios eléctricos en el medio que son interpretados por el depredador, y a partir de los cuales puede realizar una identificación y posicionamiento de su presa. Son notables en este ámbito los tiburones, que poseen células receptoras capaces de detectar diferencias de hasta 5nv en bajas frecuencias [2][7].

Pero la electro-comunicación no queda relegada al campo de los seres acuáticos. Fuera del agua, las abejas productoras de miel poseen también receptores eléctricos y son capaces de detectar, por ejemplo, si otra abeja ha recolectado el polen de una determinada flor en base al potencial en sus pétalos, debido a que al volar de flor en flor las abejas se cargan de energía electrostática, que depositan al posarse [5].

2.1.1 Electro-recepción activa y Electro-localización

La principal característica de la electro-recepción activa frente a la pasiva es la propia emisión de impulsos eléctricos para realizar la reconstrucción del medio. Este mecanismo es característico de los peces débilmente eléctricos como el pez elefante, al cual proporciona la posibilidad de navegar por aguas turbias o sin visibilidad [3][6][15].

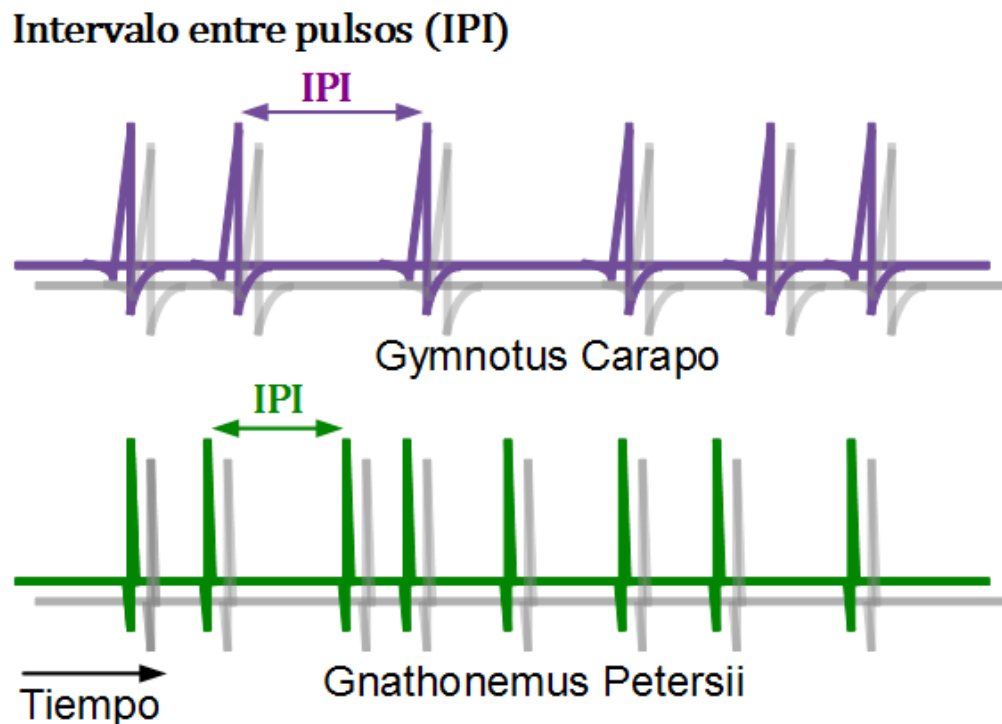


Figura 3: Distintos modelos de pulso según la especie.

Todos los peces eléctricos poseen un conjunto de células eléctricas derivadas de células musculares o neuronales que forman el órgano eléctrico, encargado de emitir los impulsos eléctricos. En el caso de los Gnathonemus, dentro de los Mormíridos, este órgano está formado por miles de células concentradas en la zona del pedúnculo caudal [8].



Figura 4: Localización del pedúnculo caudal.

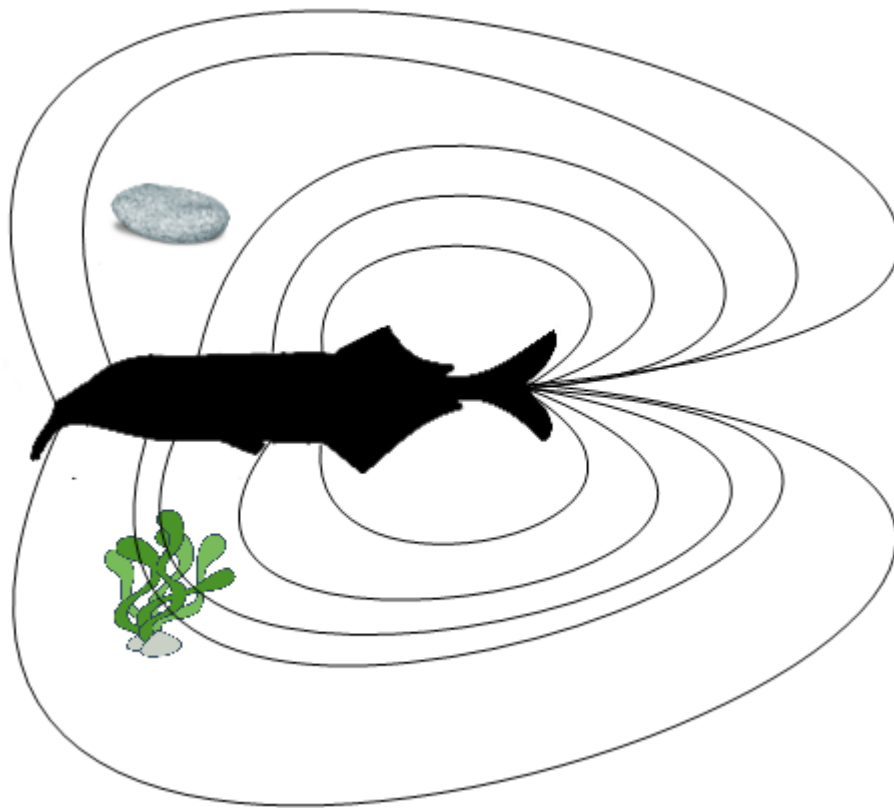


Figura 5: Electrolocalización. Las líneas de campo eléctrico se concentran alrededor de los elementos más conductivos que el agua y se dispersan alrededor de los menos conductivos[9].

Aquellos objetos cercanos con una resistencia o conductividad distinta a la del agua, perturban el campo que percibe el pez. Estas perturbaciones en la conductividad del medio son recibidas por las células electro-receptoras situadas por toda la superficie del cuerpo del pez. El pez elefante entonces interpreta y procesa esta información, generando entonces la llamada imagen eléctrica [9][15][17]. Tras crearse una imagen eléctrica del entorno, el pez reacciona ante lo que “siente”. Este proceso ocurre una y otra vez durante toda la vida del pez, que emite pulsos a una velocidad media aproximada de 150 pulsos por minuto, reduciéndose en casos de extrema tranquilidad (aislamiento social y territorio muy conocido) y aumentando en caso contrario.

2.1.2 Electrocomunicación

El canal eléctrico es invisible para la mayoría de las especies y por este motivo, los peces que utilizan estos impulsos para la comunicación han tenido una importante ventaja evolutiva. Este “canal privado” de comunicación se basa en que un individuo emite impulsos muy similares a los utilizados para la electro-localización (de bajo potencial, pero con frecuencias de emisión más altas) y son recibidos por los electro-receptores de otro individuos, que los interpretan en función

de la frecuencia de emisión (IPI – Inter-Pulses Interval) y la longitud del pulso. A partir de esta información pueden determinar aspectos como el sexo o el dominio territorial, así como procesos de cortejo o ataque [1][8][10][30].

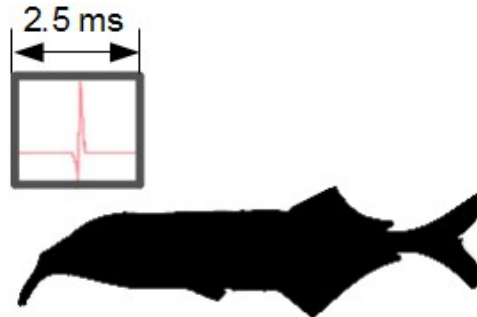


Figura 6: El pulso del *Gnathonemus petersii*

Muchos estudios se han realizado sobre este área, tratando diversos temas relacionados como la capacidad de modulación de las señales, que se investiga con la intención de mejorar las áreas de procesado y compresión de la información, aprendiendo de los métodos utilizados en la naturaleza. La precisión de los receptores eléctricos de los peces elefantes es tal que les permite además estimar el valor de resistividad o capacidad de un objeto a su alcance dependiendo del comportamiento del campo y las perturbaciones que produzcan en él los objetos a su alrededor. La capacidad de discriminación eléctrica de cada pez está relacionada directamente con el tamaño del pez, el tamaño del objeto y la diferencia en su conductividad con respecto a la del medio [11].

2.2 El problema de la precisión temporal y la solución mediante software capaz de trabajar en Real Time

Como se motivó en la sección 1.1, la precisión temporal que se necesita en un sistema capaz de estimular al pez debe ser al menos tan buena como la del pez. Para conseguir dicha precisión es necesaria la utilización de una plataforma completa de adquisición de datos y procesado en tiempo real, con retardos mínimos para poder tener una precisión del orden de las décimas de milisegundo. Para abordar este problema, se pueden dividir las soluciones en dos grandes grupos:

1. Las soluciones hardware, que a su vez se pueden dividir en dos grupos
 - a) Los sistemas analógicos muy rápidos, pero que por contra son incapaces de realizar tareas mucho más complejas que la simulación de capacidades o impedancias [13].
 - b) Los DSP's, aunque su utilización supone un coste mucho mayor.

Estado del arte

2. Las implementaciones a través de software. Son posibles debido a que la rapidez de los DAQ y de los ordenadores de sobremesa ha aumentado lo suficiente en los últimos años. La tasa de actualización de datos es crítica en este proceso y por tanto la velocidad del sistema en el que se ejecute el software es un requisito que se ha de cumplir para un correcto funcionamiento.

El ancho del pulso del *Gnathonemus petersii* es de aproximadamente 0.8 ms de media, y se ha demostrado que la información del mensaje está en el momento de emisión del pulso por lo que si queremos unas medidas fiables para la detección del pulso, necesitaremos al menos un orden de magnitud por encima.

En el Grupo de Neurocomputación biológica la opción escogida para realizar esta labor es el sistema ADCLAMP/RTBiomanager [13][12][14]. La razón de utilizar este sistema software es circunstancial: el GNB investiga sobre procesamientos de información dinámicos y para ello trabaja utilizando herramientas de adquisición y actuación en tiempo real, requisito fundamental para investigaciones en este área. Para tal labor el grupo ha desarrollado el sistema RTBiomanager.

El conjunto RTBiomanager y el DAQ utilizado son capaces de alcanzar de manera continua un período de muestreo de 66.6 microsegundos, suficientes para el muestreo del *Gnathonemus Petersii*, cuyo ancho de pulso tiene una media de 0.8ms. Este sistema nos garantiza entre 11 y 13 muestreos durante un pulso.

Debido a que este sistema está instalado y listo para funcionar en casi todas las máquinas disponibles del laboratorio y cumple con los requisitos técnicos para realizar un correcto análisis de las señales emitidas por el pez elefante, es el sistema que se va a emplear en este trabajo.

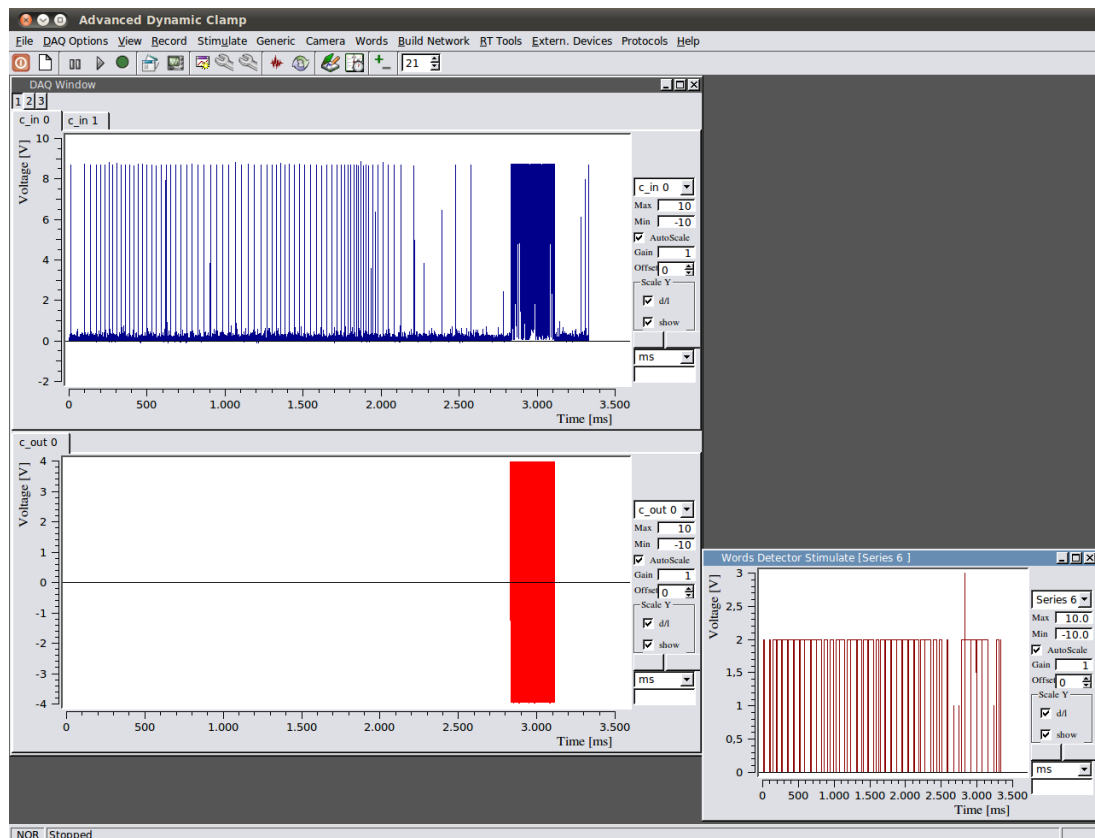


Figura 7: Captura de la interfaz del software ADCLAMP/RTBiomanager durante la detección de palabras y estimulación en tiempo real[12].

Como información adicional acerca de este sistema, se puede añadir que funciona sobre una extensión del Kernel de Linux que provee de Hard Real Time. Esta extensión se llama Real-Time Application Interface y asegura que las operaciones especificadas en el software son ejecutadas en tiempo real, manteniendo el rendimiento del sistema operativo y proporcionando una gran precisión temporal [13][12][14].

2.3 La electrónica de adquisición de datos para la caracterización y procesamiento en tiempo real de las señales emitidas por el *Gnathonemus Petersii*.

Para obtener una medición adecuada de los pulsos, es necesario un setup intermedio que filtre el ruido y amplifique la señal captada en la pecera. El diseño preliminar desde el que se partió es el diseñado y construido por el GNB en colaboración con el *Grupo de Física Computacional e Instrumentação Aplicada del Instituto de Física de São Carlos*, Universidad de São Paulo, São Carlos, Brasil. No existen apenas alternativas a este diseño, y este prototipo era el utilizado en

laboratorio. Su funcionalidad era la correcta, sin una complejidad o coste altos, por lo que se decidió emplear este circuito como referencia y punto de partida.

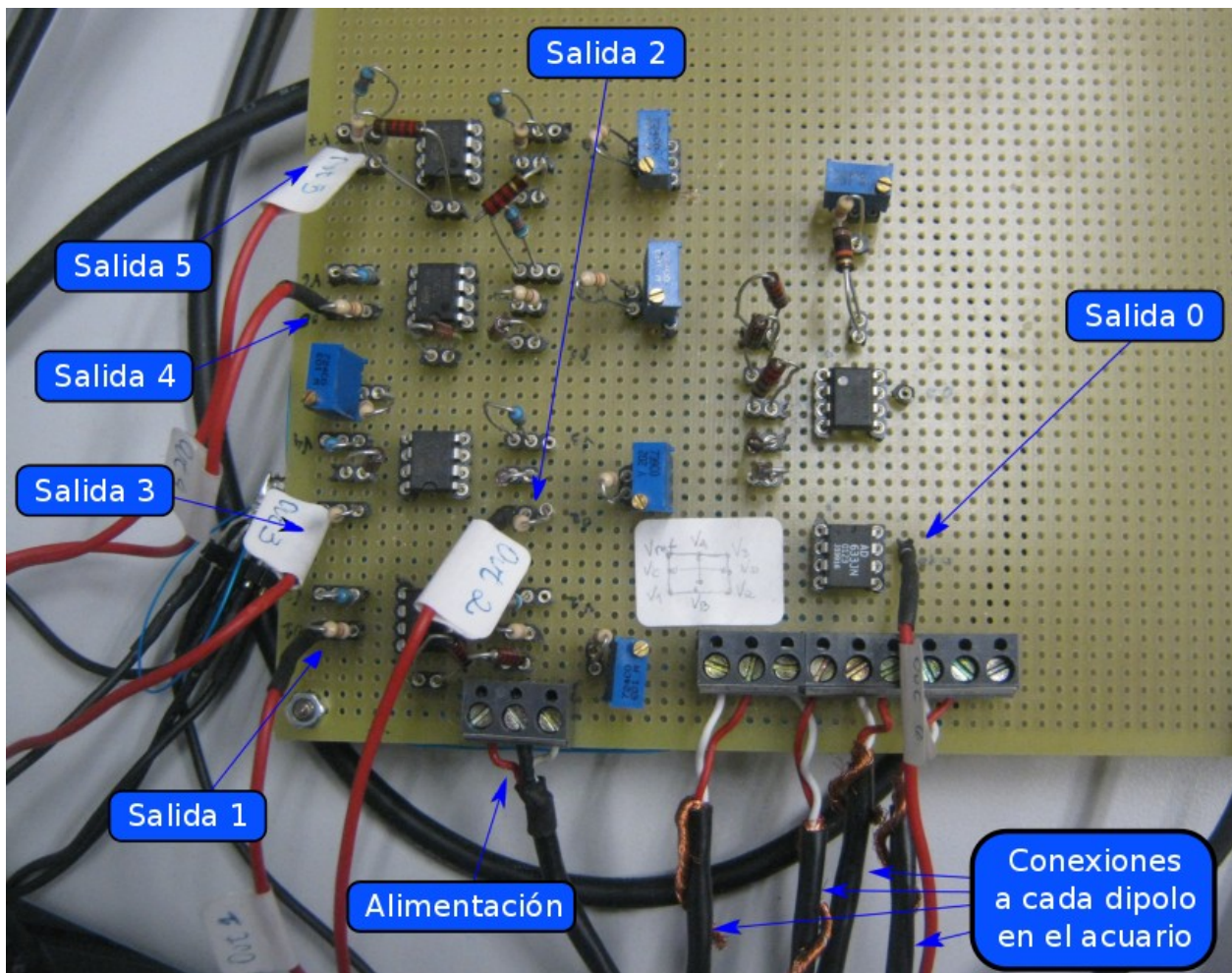


Figura 8: El antiguo circuito de amplificación construido utilizando wire-wrapping

Con el paso de los años, el prototipo ha terminado su ciclo de vida y por este motivo se decidió sustituir y mejorar esta parte del sistema, incidiendo en la flexibilidad del mismo. Una de las principales líneas de diseño era abrir las posibilidades de utilización de este circuito, así como incluirle algunas otras pequeñas mejoras de diseño que hiciesen atractivo este setup para cualquiera que necesitase realizar una tarea similar.

2.4 Procesado de la información presente en las señales emitidas por el Pez Elefante.

El pez elefante se encuentra dentro de los casos más interesantes en el área de la etología, pues es un punto de cruce clave con la neurología. Los impulsos son consecuencia directa de la actividad neuronal de estos especímenes, que realizan una codificación en frecuencia de la información que

emiten y por ambos motivos son sujetos de análisis muy valiosos [22][31]. La neurobiología se ha centrado tradicionalmente en un enfoque morfológico o puramente descriptivo sobre la organización del sistema nervioso o las neuronas. El estudio de su funcionamiento y el tratamiento que hace de la información siempre ha sido dejado en un segundo plano debido a su condición multidisciplinar (biofísica, informática, procesamiento y tratamiento de señal, fisiología, genética).

Los estudios y análisis realizados sobre el *Gnathonemus petersii* se centran fundamentalmente en este segundo apartado referido al procesamiento que realiza de la información, y por tanto avanzan en un área de la investigación con un gran potencial todavía por desarrollar.

Para analizar este procesamiento, los procedimientos que se utilizan de manera generalizada conllevan la grabación de las emisiones de los peces durante periodos largos que pueden llegar a demorarse durante días. De esta manera, y exponiendo a los individuos a distintas fuentes que les hagan modificar su comportamiento, se registran los datos y se procesan.

Durante el procesado, los grandes ficheros de grabación se discretizan y binarizan para poder calcular valores como los IPIs y obtener gráficas que muestren de manera intuitiva cómo han respondido los peces al experimento, y poder hacer una comparativa entre los resultados.

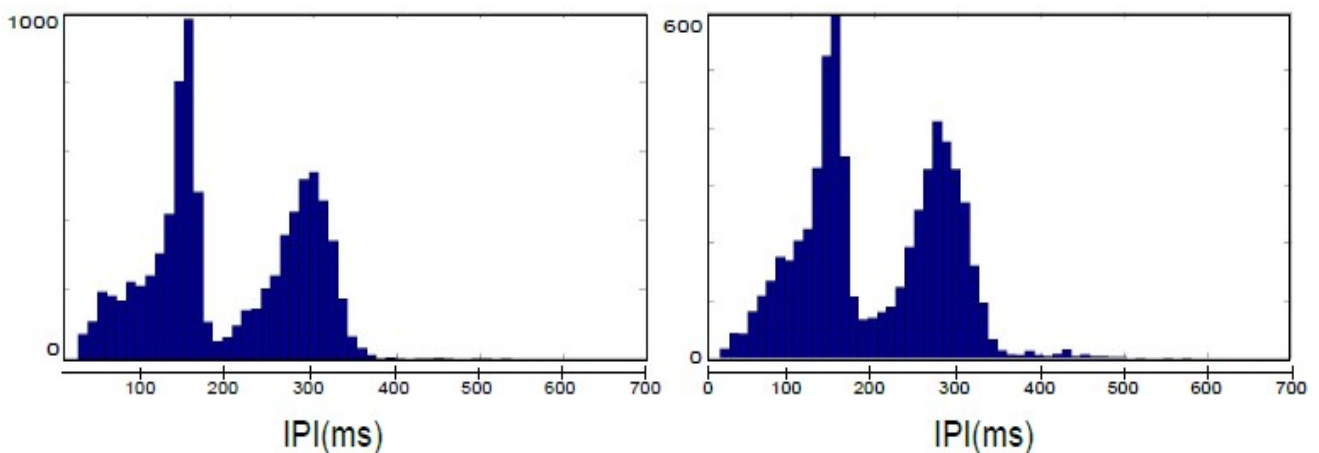


Figura 9: Histogramas según IPI(Inter-Pulse Interval) obtenidos en distintas pruebas con un *Gnathonemus petersii*

Gracias a este tipo de gráficas se ha podido aprender ciertas cosas acerca de los peces elefante, como por ejemplo que ante la presencia de un emisor, el pez elefante comienza rápidamente a emitir con IPIs más pequeños, es decir, con mayor frecuencia de emisión, o que ante la ausencia de emisión, los IPIs de menor frecuencia se mantienen, dando a entender que los impulsos menos

Estado del arte

variables y de menor frecuencia son los encargados de llevar a cabo el procedimiento continuo de electro-localización. Al cabo de los días, los impulsos de frecuencias menores se ha demostrado que disminuyen considerablemente en peces que permanecen solos en el mismo entorno [23].

Estos hallazgos han sido posibles en base al estudio y análisis de individuos aislados. Se pretende con este trabajo aportar un mayor abanico de posibilidades permitiendo la conexión de dos peceras, con la consecuente ampliación en los límites de estos experimentos, que quizá aporten más luz al desconocido todavía en gran parte proceso de comunicación entre peces elefante.

3 Diseño, Construcción y validación de un setup modular de adquisición de datos

En este capítulo se detalla todo el proceso de construcción del primer setup modular, así como las estrategias de diseño y soluciones que se han tomado para solventar los distintos problemas que se han presentado.

3.1 Objetivo

La señal emitida por el pez es fácilmente perceptible utilizando un dipolo y un osciloscopio, pero una cierta adecuación facilita el proceso posterior de análisis o detección de picos. La eliminación del ruido procedente de los filtros y calentadores de la pecera, así como la amplificación de los pulsos es fundamental para el correcto funcionamiento del sistema completo, y esta tarea es propia del circuito analógico.

3.2 Diseño

La herramienta utilizada en la fase de diseño fue KiCAD [24]. Este software de distribución libre provee de plataformas integradas para el diseño de esquemáticos y de PCBs, además de tener integradas herramientas para la comprobación de la integridad de los circuitos o librerías con la mayoría de componentes.

Para la realización del diseño se utilizó como punto de partida el esquemático del circuito mostrado en la sección 2.3, diseñado por el GNB en colaboración con el *Grupo de Física Computacional e Instrumentação Aplicada del Instituto de Física de São Carlos*, Universidad de São Paulo, São Carlos, Brasil.

El funcionamiento básico del sistema está formado por tres fases distintas para cada dipolo:

- La fase de amplificación: en esta fase se realiza, por medio de un chip dual de amplificadores TL082 [25] una resta entre ambos voltajes de entrada y se amplifican por un valor de $91\text{k}\Omega / 2.2\text{k}\Omega = 42.36$.
- La fase de suma: En esta parte del circuito se hace uso de un chip LM741 [26] que hace las veces amplificador sumador, con una ganancia de $10\text{K}\Omega / 220\Omega = 45.45$.

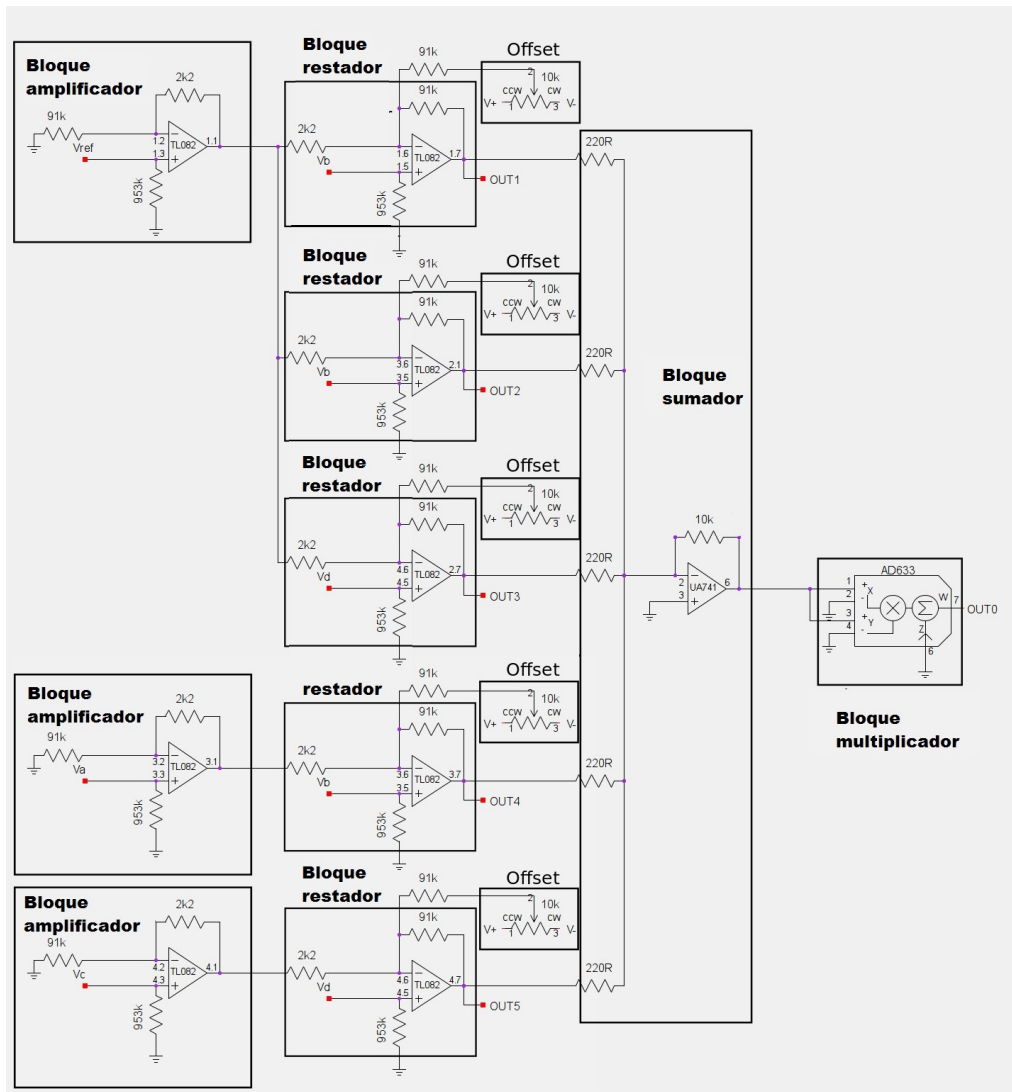


Figura 10: Esquemático del circuito amplificador utilizado como referencia

— La fase de multiplicación, en la que el protagonista es el chip AD633 [27]. Para conseguir una señal fácilmente interpretable por software y resistente a cambios en la posición del pez en el acuario que hacen que el valor recibido en unos y otros dipolos sea distinto, se realiza una suma de la señal y ésta se eleva al cuadrado, multiplicándola por si misma en el AD633.

El resultado de esta última operación es el que se toma por lo general de cara al procesamiento de los datos, porque como se ha mencionado en la sección 1.1, al parecer el punto más importante en los procesos de comunicación reside en el instante de emisión de los pulsos, no en la amplitud. Por este motivo se puede tomar una señal elevada al cuadrado, que proporcione una medición mas estable, ya que siempre habrá, aunque no todos, varios de los dipolos captando los pulsos y colaborando en la suma.

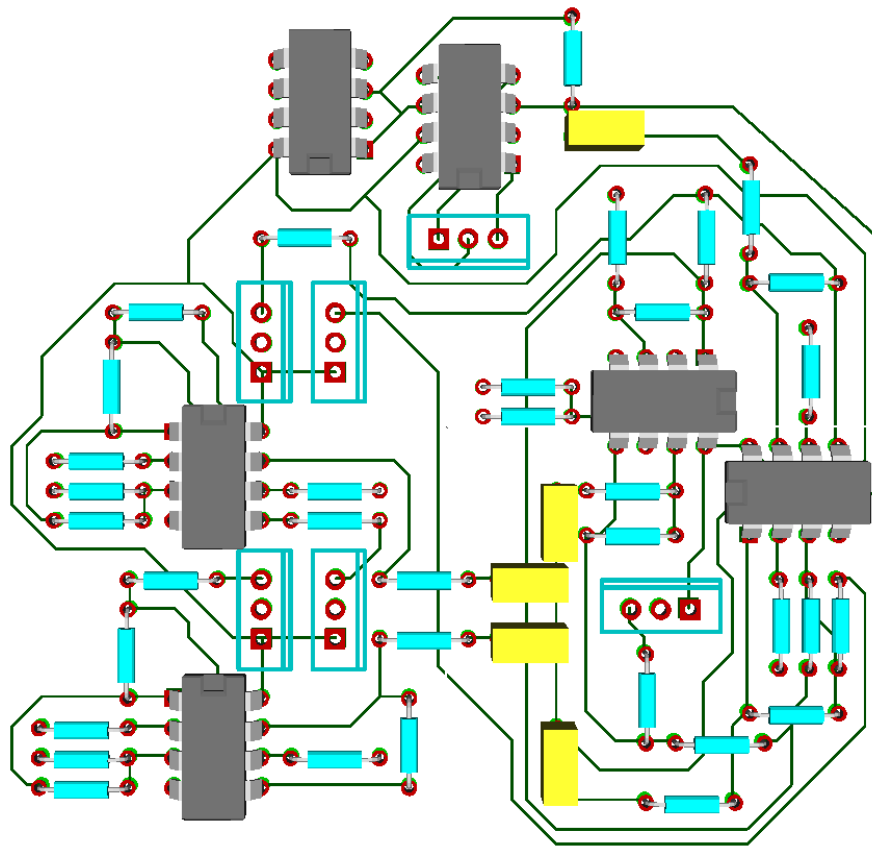
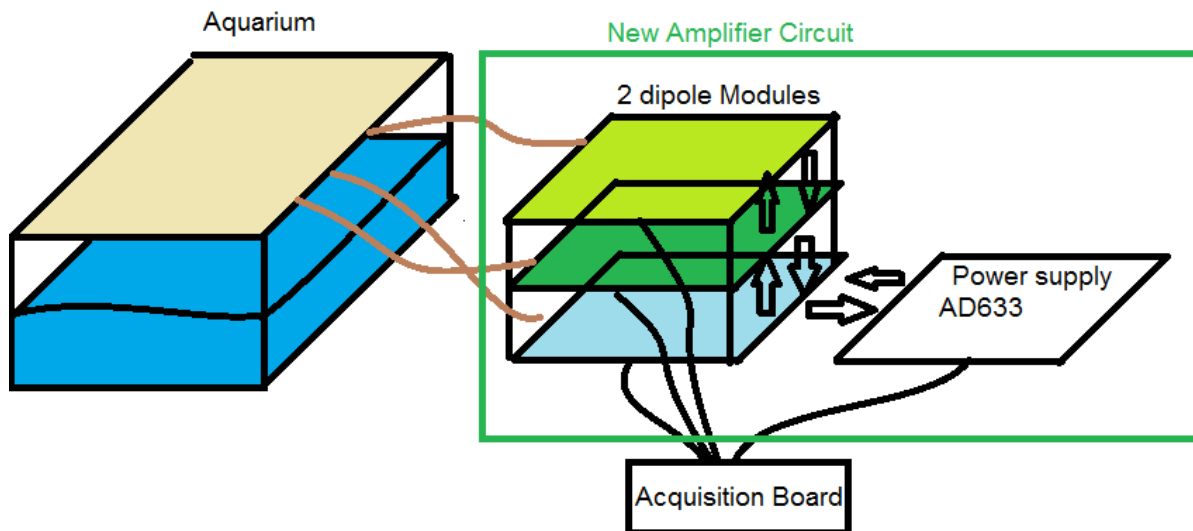


Figura 11: Diseño inicial del circuito sobre PCB

A partir de dicho diseño, se realizaron los procesos de rutado y emplazamiento de componentes en la PCB. El resultado fue el mostrado en la figura 11, pero se decidió descartar y realizar un diseño más complejo, que soportara modularidad. Al imponer como regla de diseño la división del circuito en distintos módulos, se tuvo que rediseñar desde los esquemáticos hasta los enrutados, que cambiaron radicalmente.

La decisión final fue crear dos modelos distintos de placa, uno para la amplificación y suma parcial, y otro para completar la suma así como la multiplicación final. De esta manera, en lugar de tener una placa fija que soporta hasta cinco dipolos, se dispondrá de una placa fija que se emplea para realizar la multiplicación, y placas apilables de dos dipolos cada una, que puedan utilizarse con cualquier número de dipolos necesario.



Prototipo del sistema apilable antes de comenzar con la fase de diseño

Entre las mejoras destacables que se implementaron al setup al convertirlo en un sistema modular se pueden nombrar:

- La inclusión de diodos de protección y condensadores de filtrado de ruido frente a la fuente de alimentación, aprovechando que el módulo base de suma y multiplicación disponía suficiente espacio, debido a las restricciones en cuanto a las dimensiones del módulo base que imponían los módulos apilables. Su disposición y valores se pueden ver en el anexo A.
- La utilización de nodos verticales para permitir de manera sencilla el acoplo de nuevos módulos en el setup. Los pines verticales, además de encargarse de las cuestiones de alimentación, son utilizados también para las siguientes dos tareas:
 - Distribuir los voltajes de referencia en los distintos amplificadores TL082.
 - Reunir las corrientes provenientes de la salida de los mismos amplificadores, para sumarlas en el amplificador sumador LM741.

La manera de funcionar de ambos es la misma y se basa en que cada módulo posee un pequeño subnodo conectado al pin vertical que los une todos. En la figura 15 se pueden ver los pines verticales que conectan estos submódulos entre placas.

Diseño, Construcción y validación de un setup modular de adquisición de datos

- Además, se añadió la posibilidad de modificar manualmente el voltaje de referencia utilizado en los dipolos, simplemente modificando algunos de los jumpers. También se puede activar o desactivar la participación de algunos dipolos a la suma (Ver anexo B).

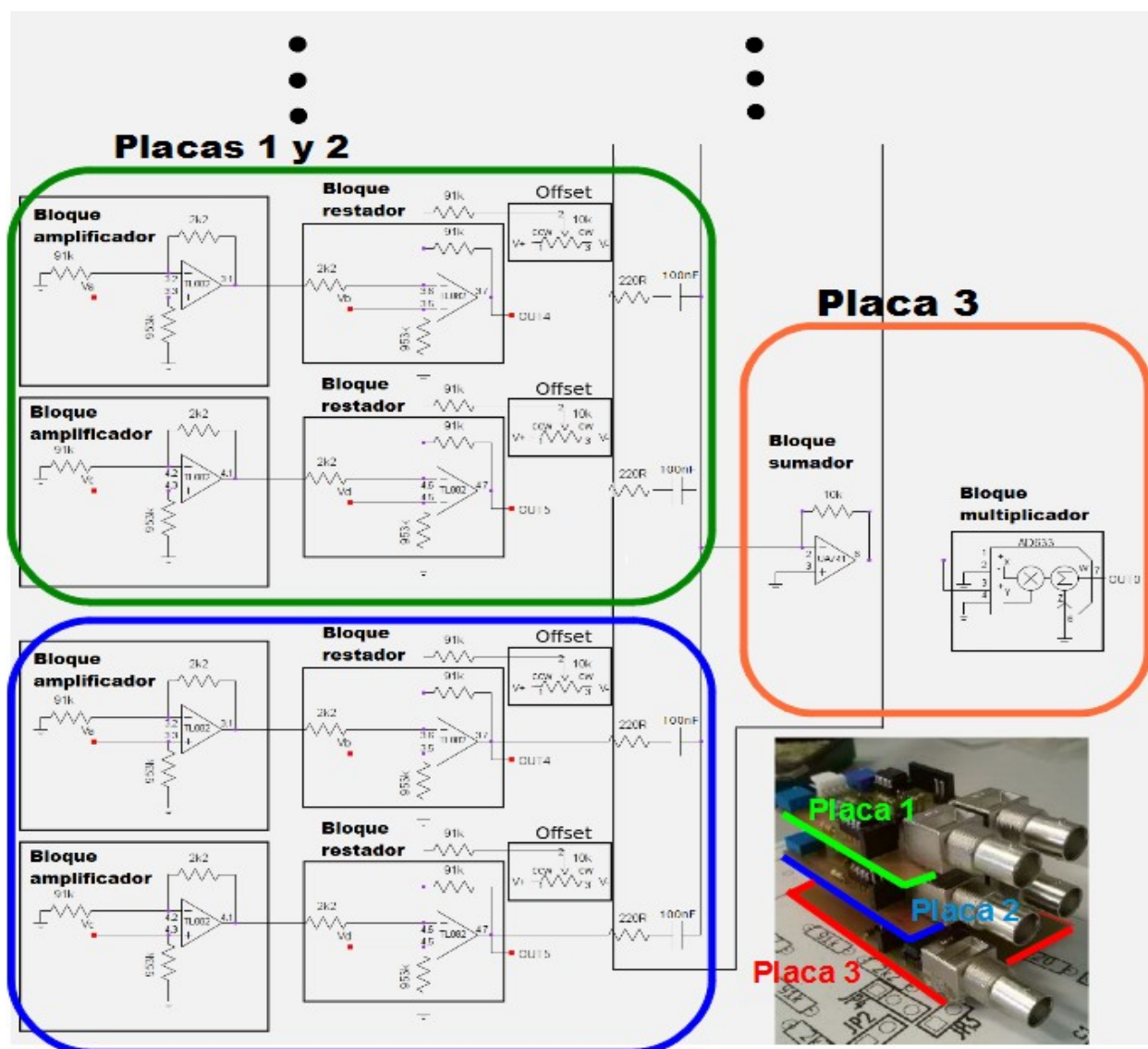


Figura 12: Esquema orientativo sobre la división en módulos sobre el esquemático

Durante el proceso de diseño se hicieron patentes las múltiples ventajas de diseño que proporcionaba la idea de incluir en la estructura apilada la placa de multiplicación y directamente se elaboró la estructura de acuerdo a la nueva idea. Como se puede ver en la figura 12, el módulo dedicado a la multiplicación se convierte en la placa base y encima de ella, apilados, todos los módulos necesarios tipo 1 de amplificación y suma con capacidad para dos dipolos cada una.

Diseño, Construcción y validación de un setup modular de adquisición de datos

Una vez realizados los esquemáticos (ver anexo A) se comenzó el diseño sobre PCB de ambas placas. Se tuvo que tener en cuenta la verticalidad de las placas a la hora de situar los componentes, ya que los pines verticales debían coincidir en sus coordenadas relativas.

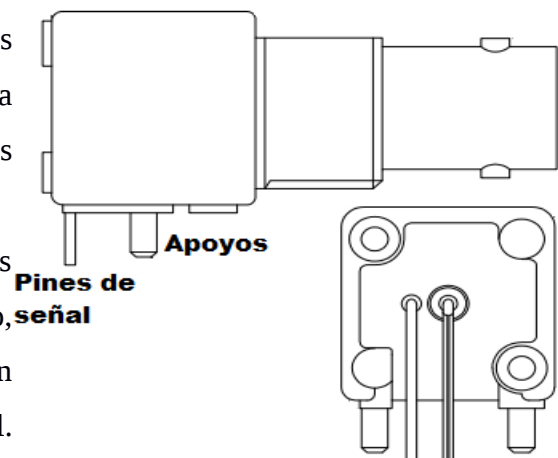
En cuanto a la asignación de componentes (se puede ver una lista con todos ellos en el anexo E), se tomaron varias decisiones:

- Utilizar conectores tipo BNC para aumentar la robustez y calidad de las señales, así como comodidad de utilización del circuito.
- Utilizar resistencias variables que se pudieran manipular desde un lateral (ver figuras 19 y 47). De esta manera permiten su modificación incluso durante el funcionamiento del circuito, lo cual permite un calibrado rápido del sistema.
- Utilizar pines verticales tales que su longitud permitiese la colocación del resto de componentes, especialmente los conectores BNC que son los más problemáticos en cuanto a dimensiones (ver figura 17).
- Utilización de conectores que fuesen “Plug&Play” para facilitar el uso rápido y cómodo del circuito. Para este propósito se escogieron los conectores MOLEX de la serie KK por su reducido coste, protección contra desconexiones accidentales y sencillez de montaje y utilización. En el anexo D se puede encontrar más información acerca de los dipolos conectados a estos conectores.
- Protección del circuito en conjunto mediante el uso de zócalos para los chips, que permiten en caso de cualquier problema una rápida y limpia sustitución (ver figura 19).

- En general, utilizar componentes cuyas patas pudieran ser montadas en el circuito teniendo en cuenta los tamaños de vía disponibles en el Taller de Circuitos Impresos donde tendría lugar el fresado.

Además, se tuvo que tener en cuenta la posición de los conectores BNC porque debido a su tamaño y peso, debían ser soldados a la placa para no ejercer un esfuerzo demasiado grande sobre los pines de señal.

Por este motivo, otra de las restricciones de diseño fue



Dibujo 1: Detalle del conector BNC.
Fuente: www.rs.com

Diseño, Construcción y validación de un setup modular de adquisición de datos

que el plano de masa coincidiese con los apoyos de estos conectores para así poderlos soldar cómodamente a la placa.

A continuación se muestra el resultado final del diseño de las PCBs en KiCAD:

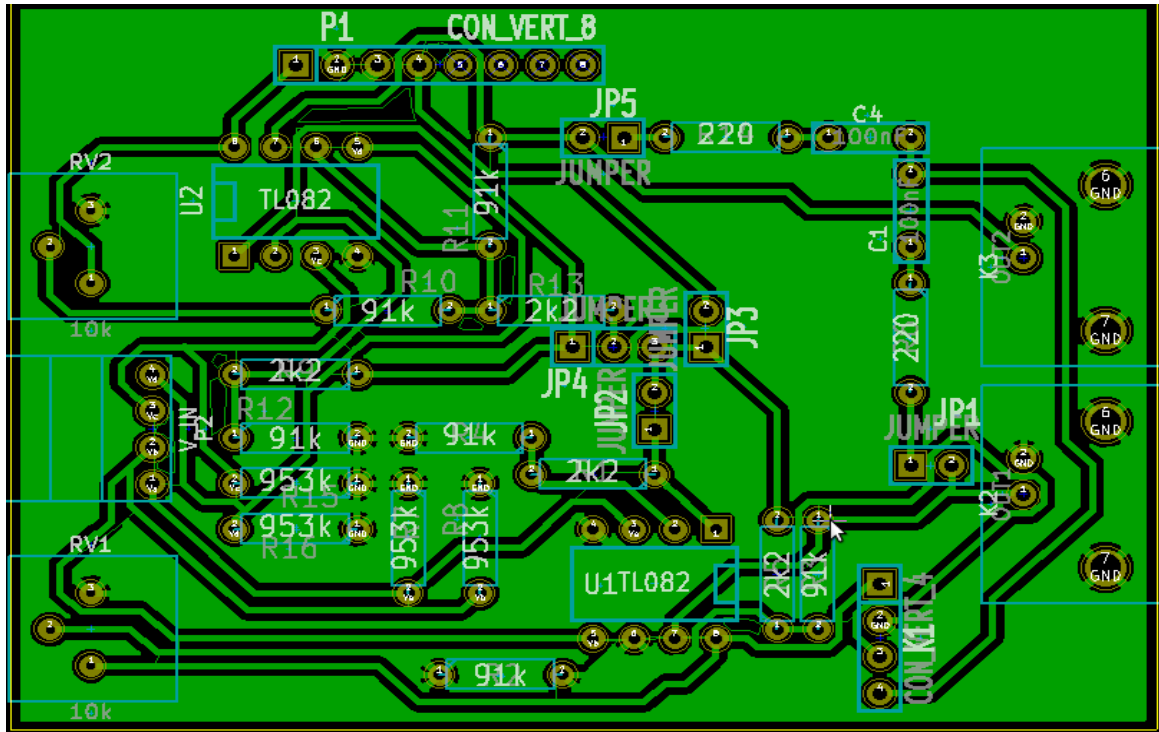


Figura 13: Diseño final de la PCB. Placa 1.

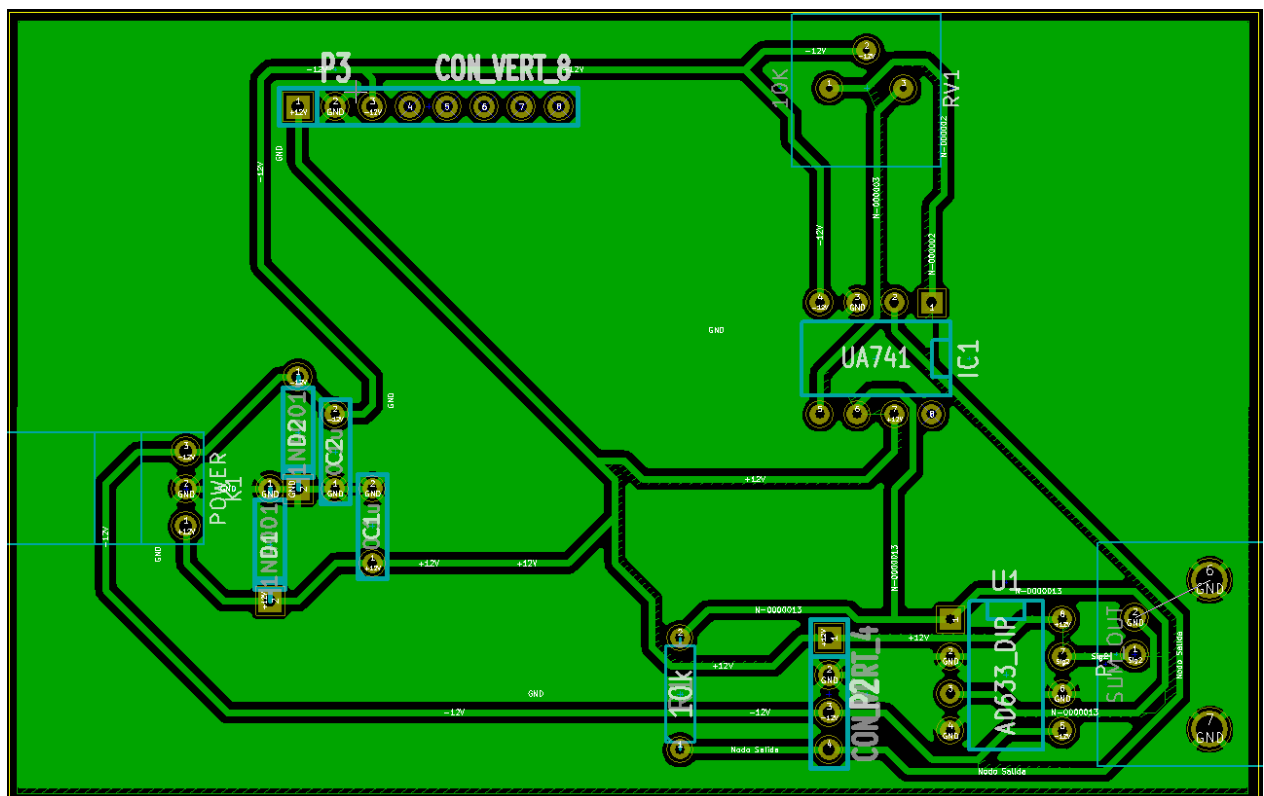


Figura 14: Diseño final de la PCB. Placa 2.

3.3 Modularidad

Gracias a la posibilidad de utilizar módulos independientes, el número de dipolos utilizados es variable y esto permite la utilización de este sistema en un innumerable conjunto de casos. El añadir más placas-módulo proporciona cada vez más sensibilidad al conjunto, pero esta sensibilidad también afecta al ruido, que se introduce al conjunto total. Esto se puede ver como un inconveniente, pero no resulta en absoluto un problema para un setup en el que el número de placas y dipolos utilizados es completamente configurable, quitando y poniendo módulos o utilizando los jumpers de configuración. De esta manera, se puede optimizar fácilmente el número de placas utilizadas para cada caso concreto haciendo unas cuantas pruebas y medidas.

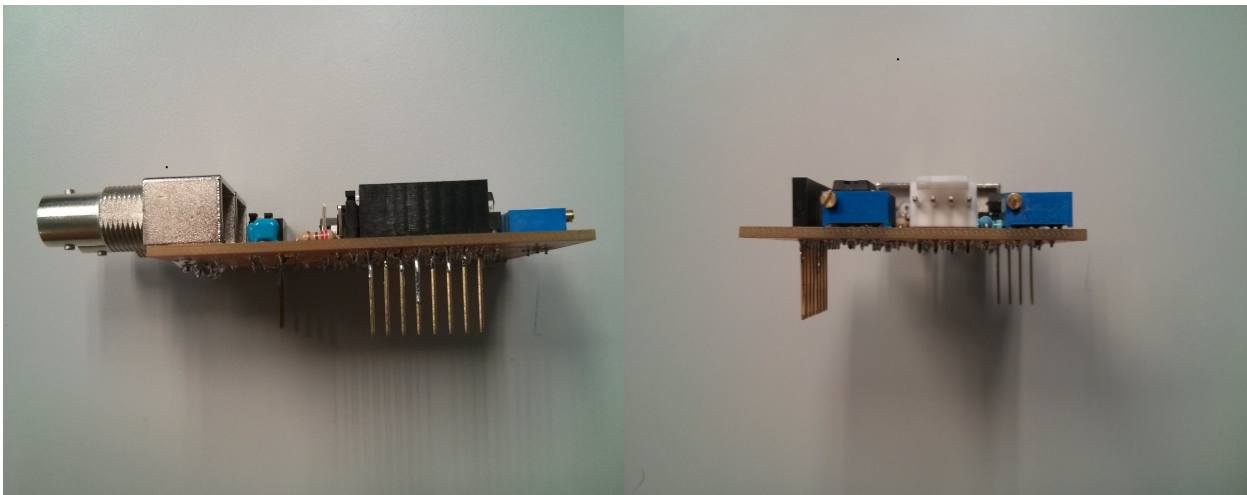


Figura 15: Uno de los módulos construidos. Vista lateral y posterior. Módulo apilable.

Pero un sistema pensado para su utilización en múltiples escenarios debe ser abierto y fácilmente reproducible por cualquier persona. Los diseños finales se pondrán a disposición de los interesados en la página web del Grupo de Neurocomputación Biológica ([Página web del GNB](#)) siguiendo con la filosofía OpenSource que marca todo el proyecto.

En cuanto al software utilizado, se ha continuado por la misma senda del diseño abierto al público y se ha empleado KiCAD, de libre distribución. De esta manera, una persona interesada en utilizar estos diseños no tendría que preocuparse de la adquisición de licencias.

3.4 Construcción

El proceso de construcción de las placas se llevó a cabo en el Taller de Circuitos Impresos de la Escuela Politécnica Superior de la UAM. Para ello se ha utilizado la máquina de fresado de prototipos LPKF ProtoMat S100 [28]. El diseño utilizado es de simple cara y se ha materializado sobre un sustrato FR-4 (fibra de vidrio).

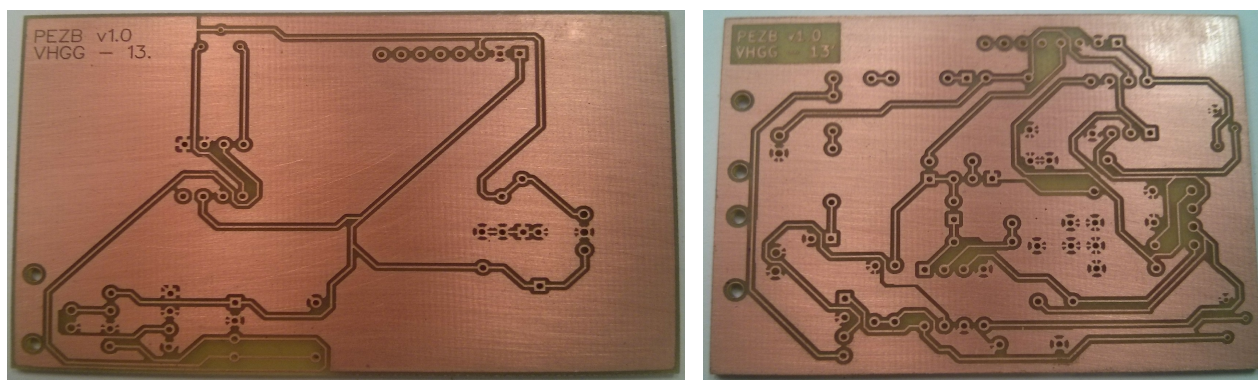


Figura 16: Primeras placas, versión inicial. Módulo base a la izquierda y módulo apilable a la derecha

El proceso de soldado, así como el montaje de los conectores Molex KK se realizó manualmente dada la sencillez del circuito y que el grosor de los pines lo permitía.

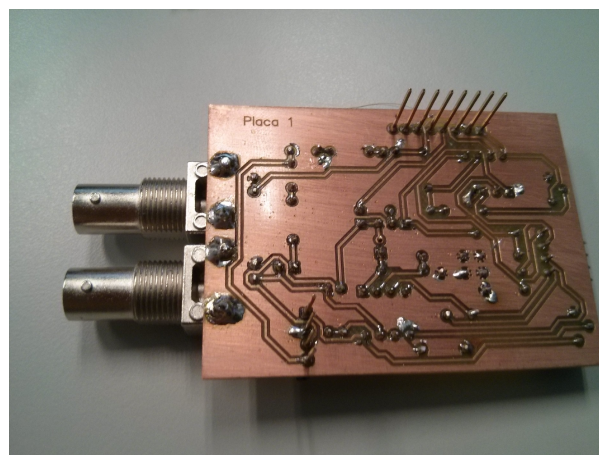
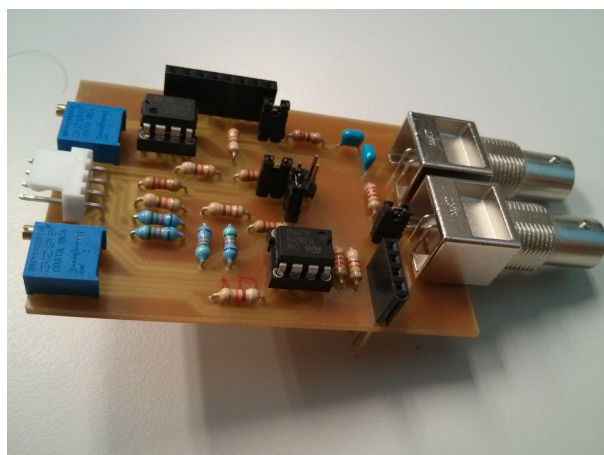


Figura 17: Últimas placas soldadas, versión final, módulo apilable. Sus partes en detalle se pueden ver en la figura 20.

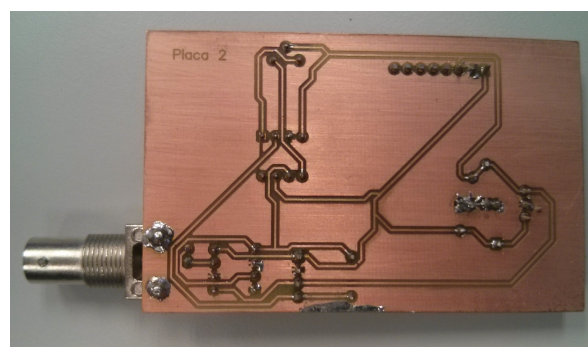
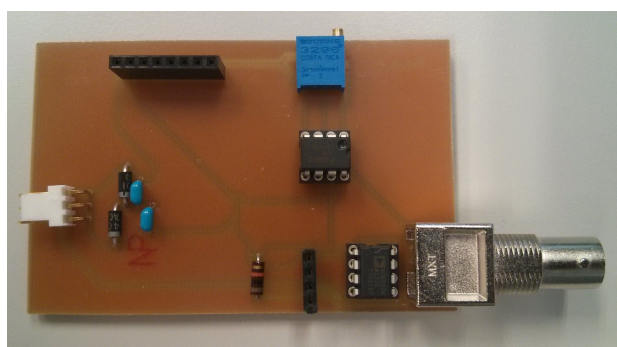


Figura 18: Últimas placas soldadas, versión final, módulo base. En la foto de la izquierda se pueden ver, de izquierda a derecha: El conector MOLEX KK", los diodos de protección y los condensadores de desacoplo, el conector vertical de 8 pines. Después el chip sumador UA741 y el multiplicador AD633, y por último el conector BNC del que sale la señal sumada y al cuadrado.

3.5 Validación e Integración

Durante el montaje de la primera PCB aparecieron multitud de pequeños detalles de diseño que hicieron necesaria una segunda ronda de impresiones. La gran mayoría de estos problemas surgieron debido a las librerías de componentes de KiCAD, que no estaban actualizadas.

Por este motivo algunas vías no eran lo suficientemente grandes para permitir el paso de las patas de los componentes correspondientes y algunos pines no estaban asignados correctamente a los nodos adecuados. Estos problemas obligaron a corregir o rediseñar los footprints dentro de las librerías de KiCAD, y reconfigurar el rutado de la placa en algunos casos.

Otro problema fundamental que no se hizo patente hasta el momento del fresado fue que el ancho de las vías utilizadas era en algunos casos demasiado pequeño y corrían riesgo de cortarse o romperse ante algún pequeño impacto. En la segunda versión impresa de las placas las pistas fueron convenientemente ensanchadas para evitar cualquier tipo de error en la conectividad de los nodos.

Una vez rediseñadas las placas se procedió a construir las definitivas, que respondieron bien a los procesos de calibración y verificación, como se puede ver en la sección 5.2.

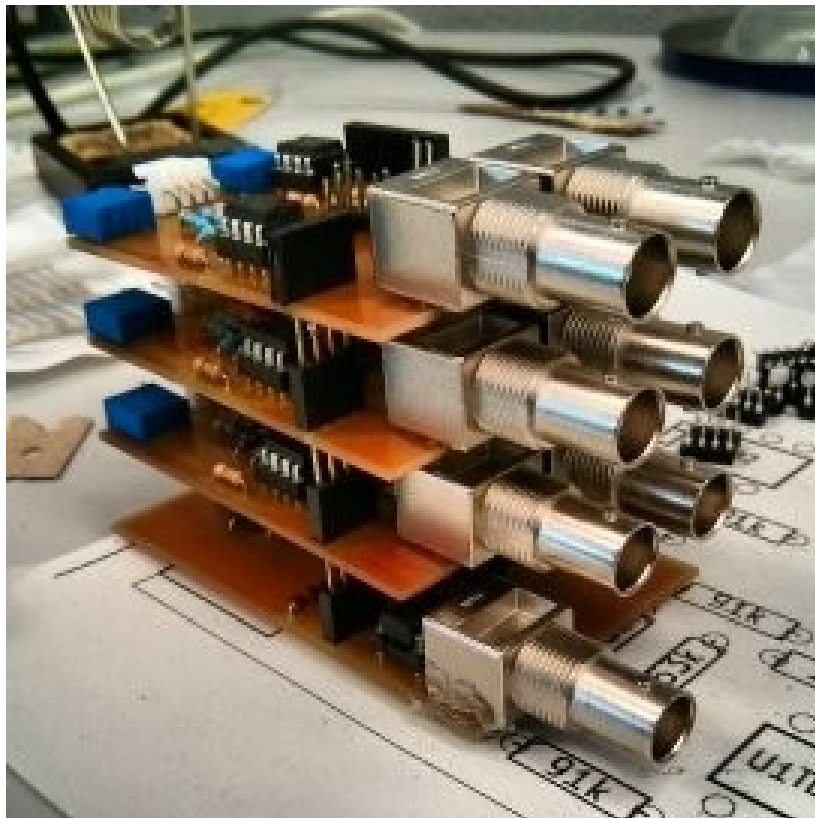


Figura 19: Primera placa construida completa y funcional.

Diseño, Construcción y validación de un setup modular de adquisición de datos

Además, en el anexo C se detalla cómo se han añadido unos soportes laterales fabricados en plástico PLA con una impresora 3D presente en el laboratorio del GNB para conseguir estabilidad en la plataforma y prevenir cortos por apoyar el circuito base sobre alguna posible superficie conductora.

A continuación se pueden ver una serie de figuras con las vistas frontal-superior y lateral del setup, así como una descripción de las partes que componen al módulo apilable.

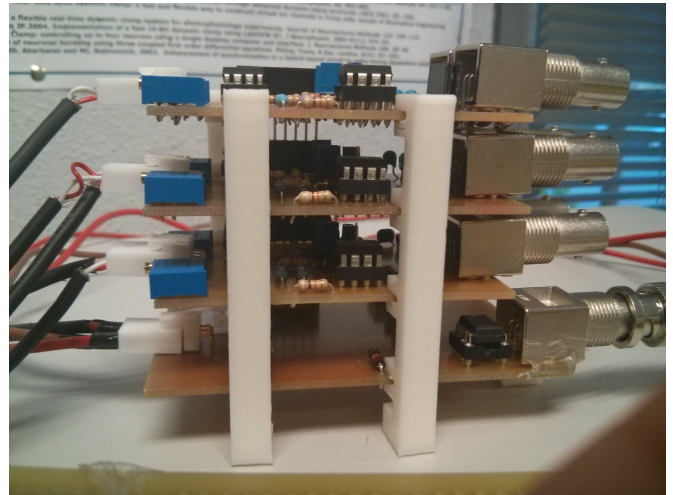


Figura 20: Vista lateral del setup, con los soportes de PLA instalados.

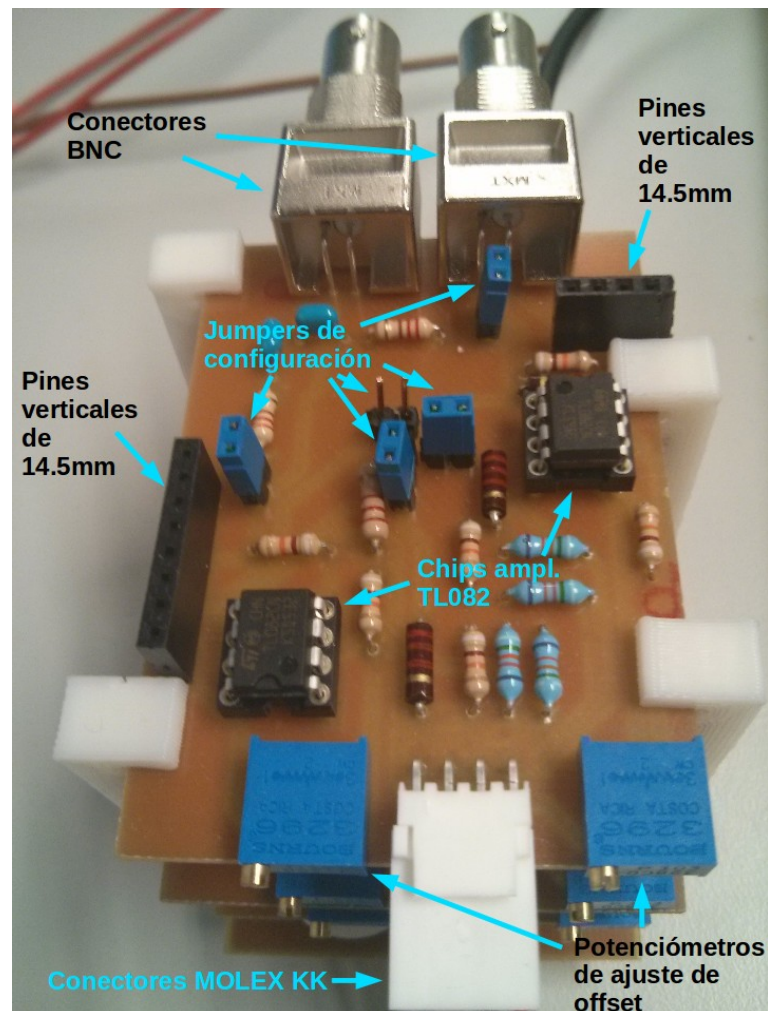


Figura 21: Vista Frontal-Superior del setup con los soportes de PLA instalados. Además se detallan las partes más características del circuito.

4 Diseño e integración de un pez artificial

Hay dos problemas fundamentales en cuanto a la realización de experimentos con varios individuos:

- El primero de ellos viene determinado por la agresividad y territorialidad de estos peces, que al permanecer en el mismo receptáculo tienden a atacarse.
- El segundo aparece debido a que los peces nadan libremente por la pecera y resulta muy complicado de identificar qué pez es emisor de qué impulso. Por tanto se complica la tarea de adquisición y recolección de datos.

Debido a estos motivos se ha optado de manera general por la utilización de un sistema menos natural pero con considerables ventajas: La emulación de un pez elefante mediante uno artificial, capaz de emitir pulsos de la manera más sencilla pero verosímil posible.

El modelado del campo eléctrico supone una tarea ardua y compleja, aunque necesaria de cara a realizar los experimentos con unas condiciones de verosimilitud óptimas. El modelo que se ha tomado como referencia [29] se basa en que el potencial negativo de los peces se acumula en pedúnculo caudal (Ver figuras 4 y 5) y que el resto del cuerpo, repleto de células electroreceptoras, actúa como parte positiva.

Este modelo se puede simplificar como un dipolo a grandes rasgos. Para representarlo, se ha utilizado una jeringa sin aguja marca Plastipak. Como además se busca que este modelo sea

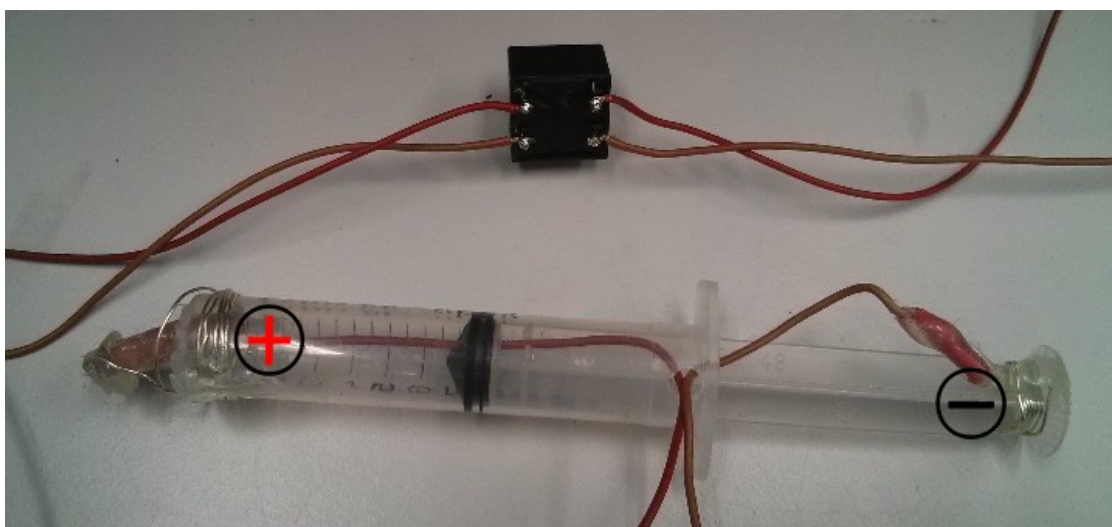


Figura 22: Pez artificial y transformador de aislamiento 1:1.

Diseño e integración de un pez artificial

variable en cuanto a longitud, se ha adaptado. Para permitir el movimiento del émbolo, este ha sido perforado para que el cable pueda pasar a través de él. Igual que en el caso de los dipolos de la pecera, los dipolos eléctricos son de plata. Para fijar la plata y los cables, se ha utilizado pegamento termofusible neutro, no tóxico para el pez elefante, que además realiza la función de aislante para la soldadura hecha con estaño.

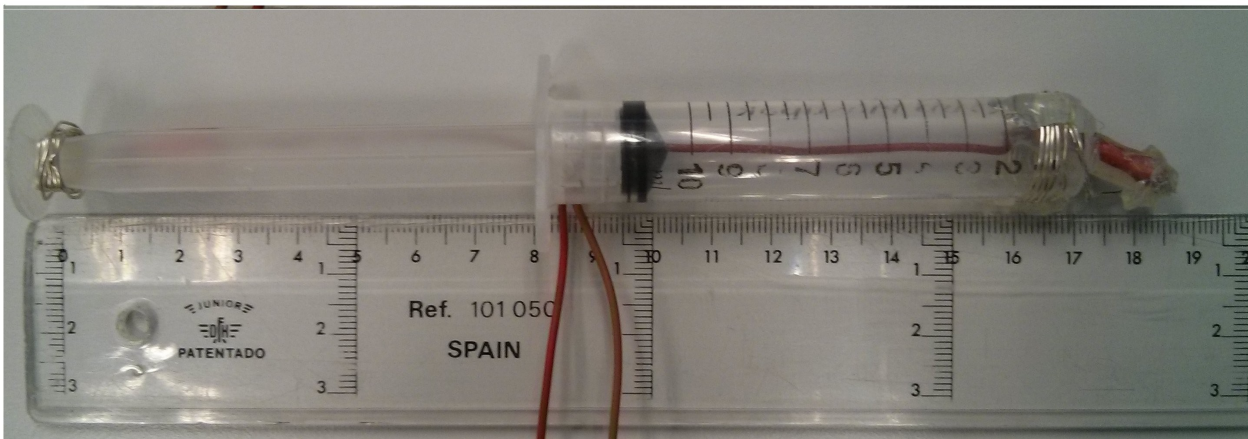


Figura 23: Detalle a escala del cambio de tamaño del pez artificial

Para evitar las derivaciones de corriente o cualquier problema que pudiera ser perjudicial para el pez se ha intercalado un transformador de aislamiento entre la salida emisora y el pez artificial. El esquema del sistema cerrado final, con la pecera construida, el pez artificial, el transformador de aislamiento y la plataforma de amplificación sobre circuito impreso se pueden ver en la figura 30.

4.1 Verificación en entorno real

Terminada la construcción del pez artificial, se procedió a realizar pruebas de control en la pecera deshabitada para confirmar que el comportamiento es el esperado. Como se puede observar en las

siguientes gráficas, el comportamiento del setup es excepcionalmente fiel, excepto en el caso de la señal procesada por el chip AD633, que pierde fidelidad.

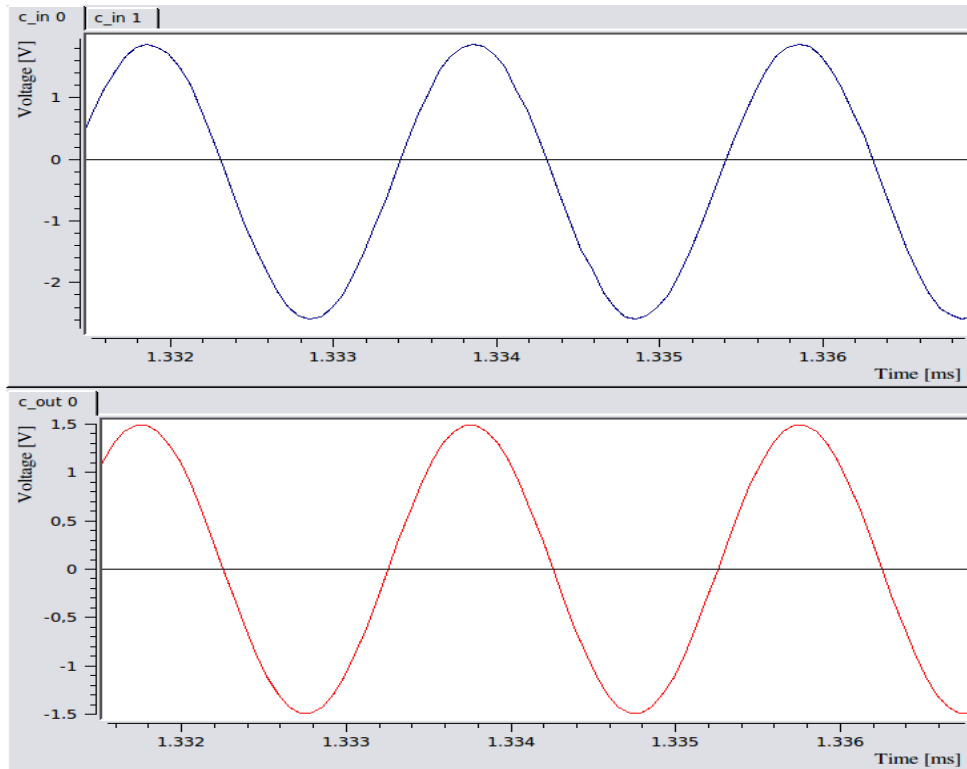


Figura 24: Detalle para la emisión de una onda sinusoidal (500Hz) registrada por un dipolo simple. La forma se conserva perfectamente.

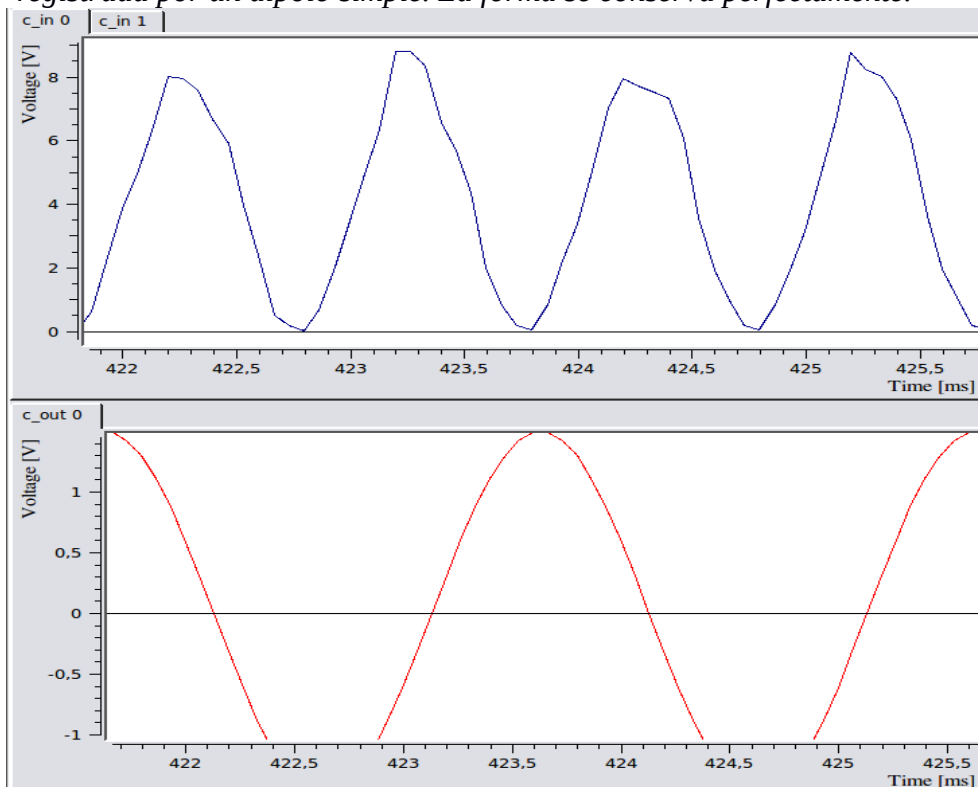


Figura 25: Misma señal que en la figura anterior, pero tomada la salida sumada y elevada al cuadrado por el AD633.

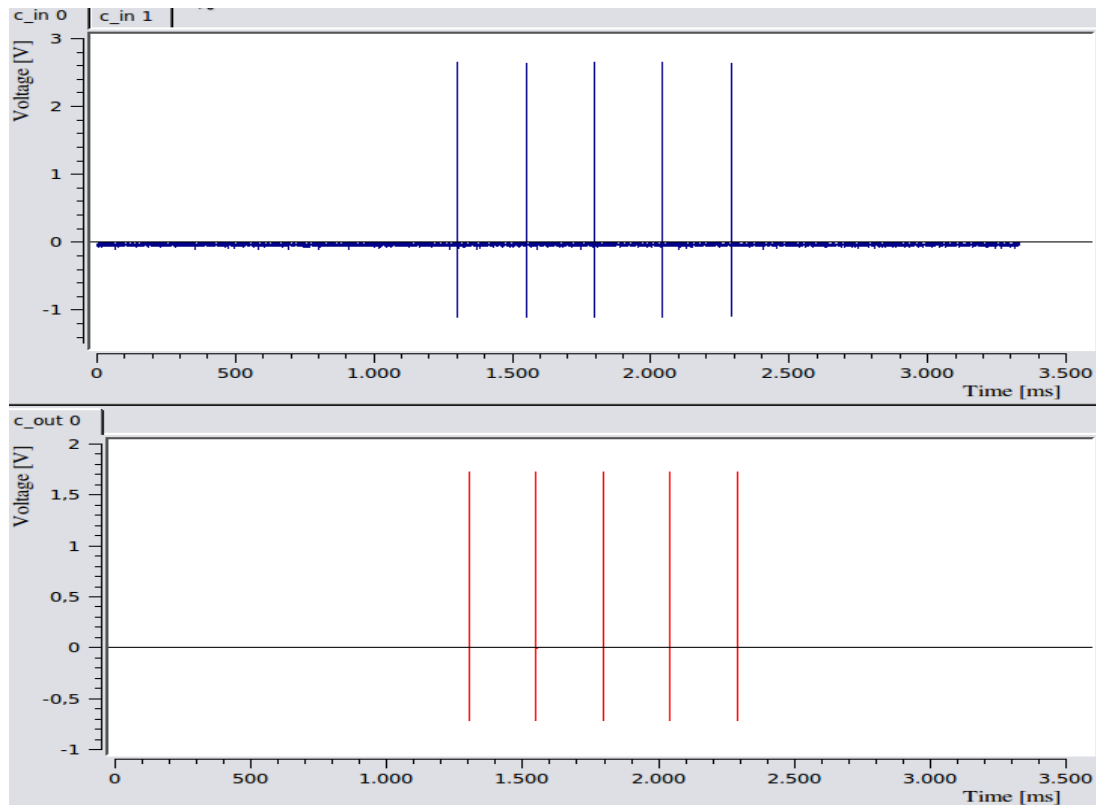


Figura 26: Verificación del funcionamiento del pez artificial. En la imagen se muestra la lectura de un dipolo (gráfica superior) tras la emisión de un tren de pulsos utilizando el pez artificial (gráfica inferior)

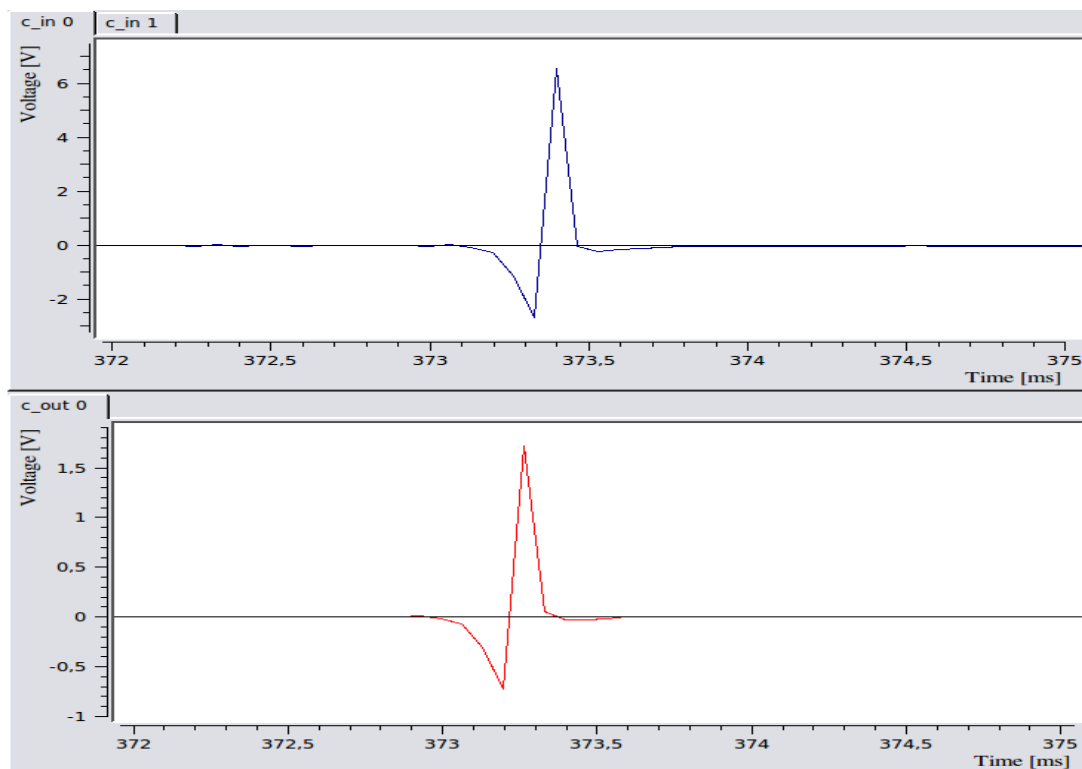


Figura 27: Aumento sobre un impulso. La función recibida es muy similar a la emitida, con un ligero retardo (Ver sección 6.1).

5 Construcción de un segundo setup modular de adquisición de datos y su integración en un acuario con distinta configuración

5.1 Diseño y montaje del sistema

De cara a la construcción del segundo sistema se tuvieron en cuenta varios factores que fueron determinantes en la construcción del primero. El primero y el más importante fue la decisión en cuanto a la distribución de los dipolos en la pecera. La opción que finalmente se tomó como más robusta era la colocación en forma de asterisco.

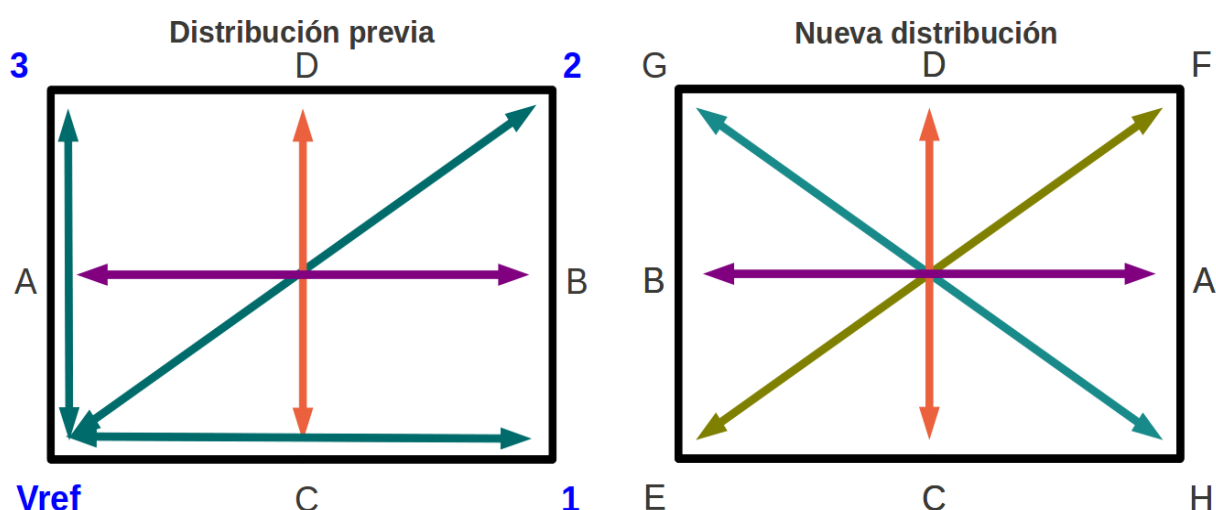


Figura 28: Distribución de los dipolos dentro de la nueva pecera frente a la previa

De esta forma, la recepción es lo menos sensible posible a la posición del pez, que dependiendo de su posición podía hacer que la recepción de datos fuese atenuada y ahora es mucho más robusta. Las pruebas experimentales han demostrado que con la nueva distribución la recepción de los impulsos emitidos por el pez es casi perfecta aunque el pez emita desde puntos conflictivos como esquinas o entre los obstáculos del fondo.

Construcción de un segundo setup modular de adquisición de datos y su integración en un acuario con distinta configuración

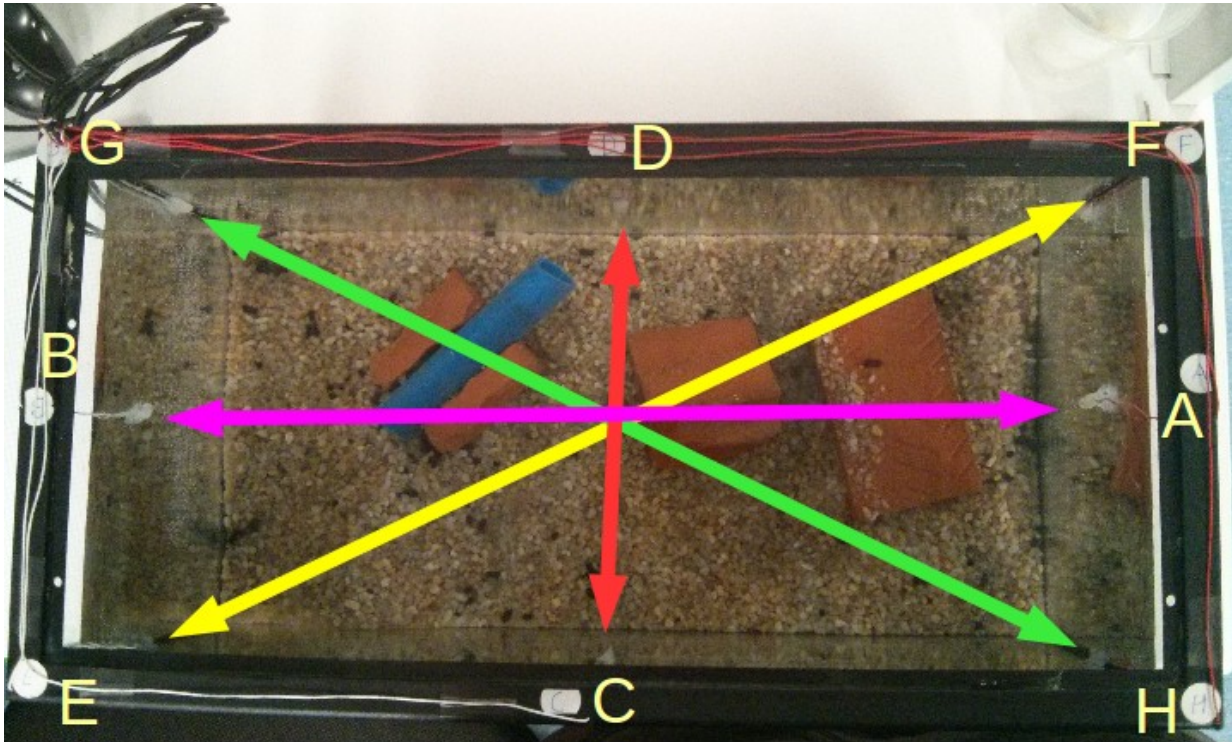


Figura 29: Distribución de los dipolos en la segunda pecera (Foto)

Otro aspecto importante de cara a la recepción idónea de los campos existentes en la pecera es la conductividad del metal receptor. Por este motivo, los puntos que ejercen de dipolos son puntas metálicas bañadas en plata. Para una descripción más detallada de cómo se han montado los dipolos en el acuario, así como la utilización de los conectores MOLEX KK, se recomienda leer el anexo D.

Construcción de un segundo setup modular de adquisición de datos y su integración en un acuario con distinta configuración

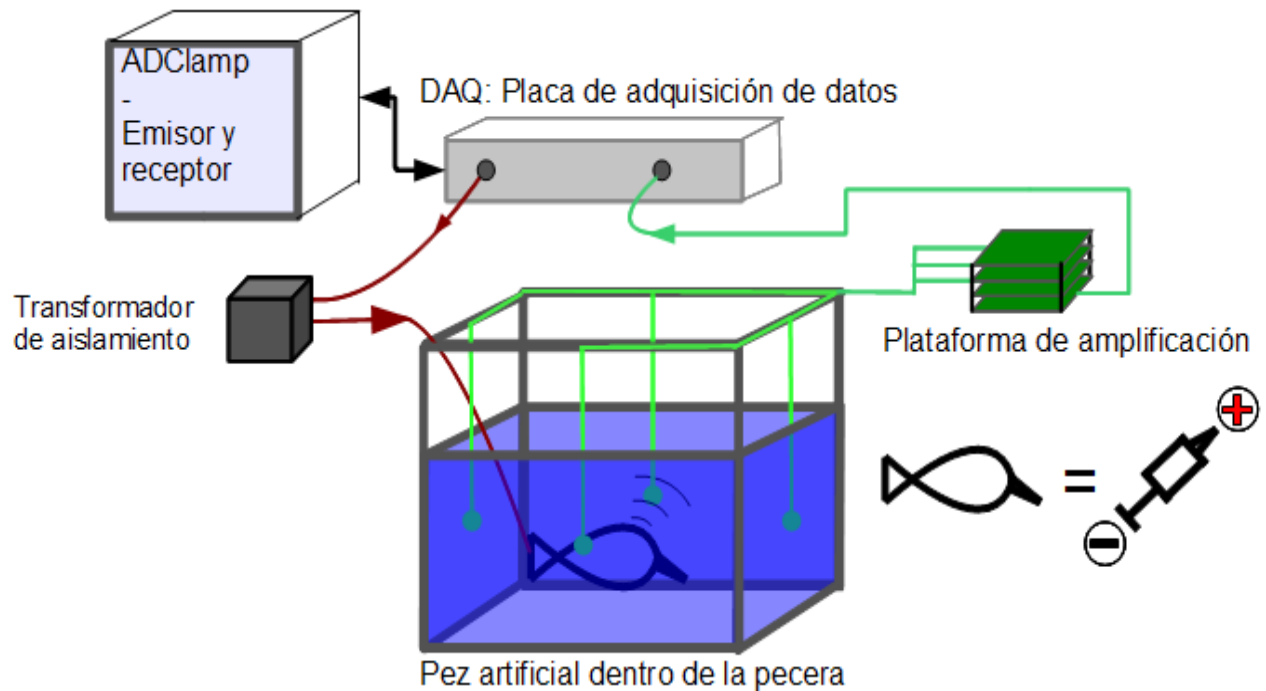


Figura 30: Esquema simplificado sobre el sistema. Nota: Para mayor claridad, se ha reducido el número de dipolos representados.

Para conseguir un ambiente menos estresante para el animal, se decidió también realizar una cobertura de gran parte de las entradas de luz a la pecera. Esto crea un ambiente menos luminoso más parecido a su hábitat natural. De hecho, tras cubrir la pecera el comportamiento habitual del pez cambió y en vez de pasar la mayor parte del tiempo oculto entre los obstáculos del fondo del acuario comenzó a desplazarse y a hacer uso de todo el espacio del que disponía con mucha mayor frecuencia.

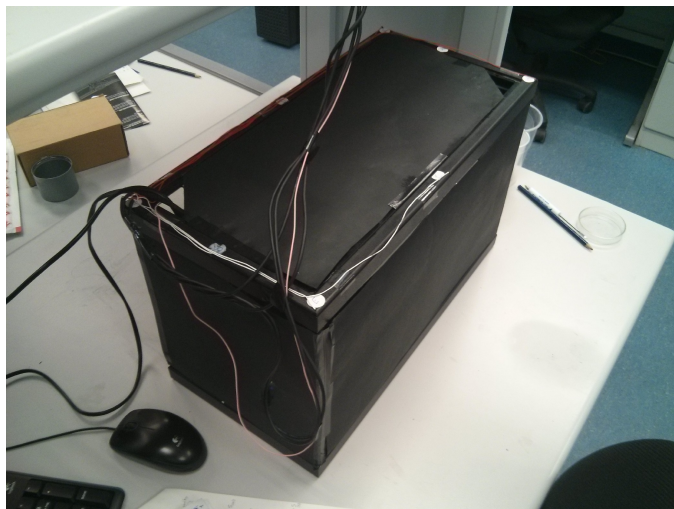


Figura 31: Adaptación final de la pecera, con las coberturas hechas a base de cartulina negra.

5.2 Pruebas y comprobaciones

El primer paso tras terminar el montaje del acuario fue conectarlo a la plataforma de amplificación y calibrar esta. Durante estas pruebas no hubo ningún problema y todo el sistema respondió como se esperaba.

Tras esta fase, se procedió a acondicionar la pecera para la vida de los peces elefante. Entre otras tareas, este proceso conlleva añadir un filtro para el agua y un calentador, y ambas son fuentes de ruido muy considerables. Al realizar medidas sobre la pecera acondicionada, apareció una fuente de ruido a 50Hz tan grande que el resultado de la suma elevada al cuadrado de los dipolos saturaba y la detección de pulsos era inviable completamente.

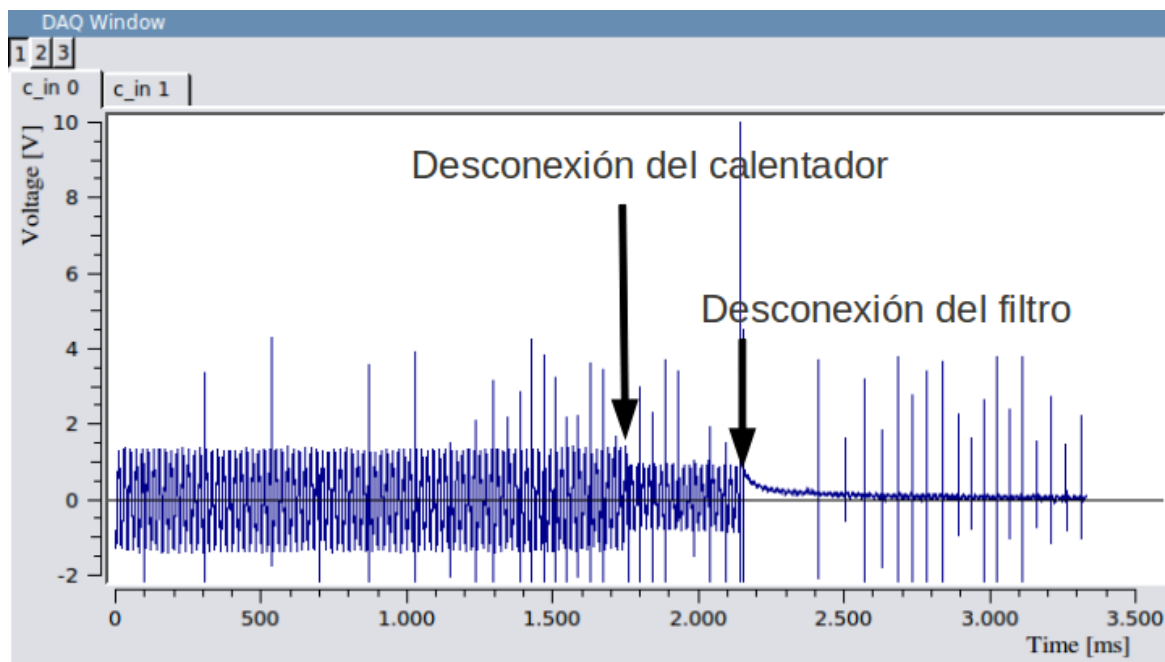


Figura 32: Ruido introducido en la pecera por los componentes eléctricos, visto desde una de las salidas de dipolo individual, sin elevar al cuadrado. Como se puede observar, el ruido en muchos casos enmascara los pulsos del pez.

Este efecto se produce debido a que ambos aparatos eléctricos generan una tensión común variable, y la salida de los operacionales varía también respecto a esta. El parámetro que mide la relación entre las ganancias común y diferencial es el “Common Mode Rejection Ratio”.

Cuanto menor es este parámetro, mayor va a ser la ganancia común con respecto a la diferencial, y esto redundará en una menor relación señal a ruido en la salida del sistema. Por ejemplo, para un CMRR como el del sistema en torno a los 105 dBs, una tensión diferencial aplicada en la

Construcción de un segundo setup modular de adquisición de datos y su integración en un acuario con distinta configuración

entrada que produzca en la salida una variación de 1V producirá, si es aplicada como tensión común una variación en la salida de $5.62 \mu\text{V}$.

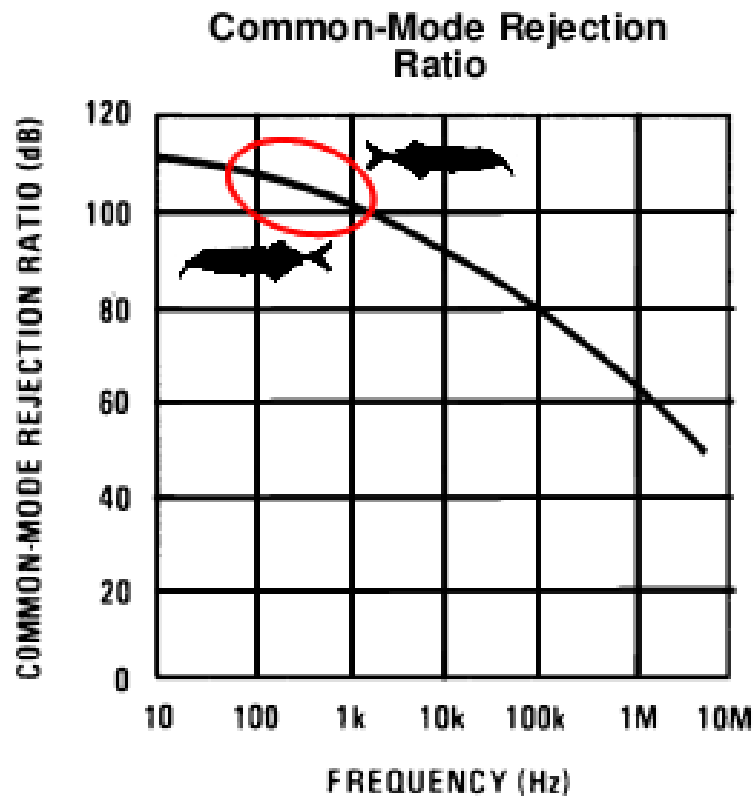


Figura 33: Gráfica con el CMRR obtenida del Datasheet del chip correspondiente al amplificador TL082. Señalado en rojo, el intervalo sobre el que oscilan los Peces elefante. Fuente: <http://www.ti.com/>

Este cálculo puede dar a pensar que este efecto no puede ser muy significativo en la salida, pero lo es si tenemos en cuenta de que en un setup medio puede haber: 6-8 dipolos sumados, a los cuales se les aplica un par de veces un factor de ganancia de aproximadamente 45x al pasar por el chip TL082 y LM741 y son elevados al cuadrado en el AD633. Aunque las fuentes de ruido sean aproximadamente de 50Hz, hay componentes de altas frecuencias también, y como se puede apreciar en la figura 33, estos circuitos son más sensibles a éstas. Experimentalmente se ha comprobado que el resultado de el ruido producido por estos elementos es una saturación completa del sistema.

Para solucionar este problema, se conectó la masa del circuito amplificador a la misma agua del acuario, anulando así los efectos de la tensión común. En la siguiente figura se puede ver cómo se ha realizado esta conexión. En cuanto a la conexión de la masa con el agua del acuario, se ha

Construcción de un segundo setup modular de adquisición de datos y su integración en un acuario con distinta configuración

realizado la misma conexión que con los dipolos (ver anexo D), es decir, utilizando cable con una cobertura de plata y pegamento termofusible.

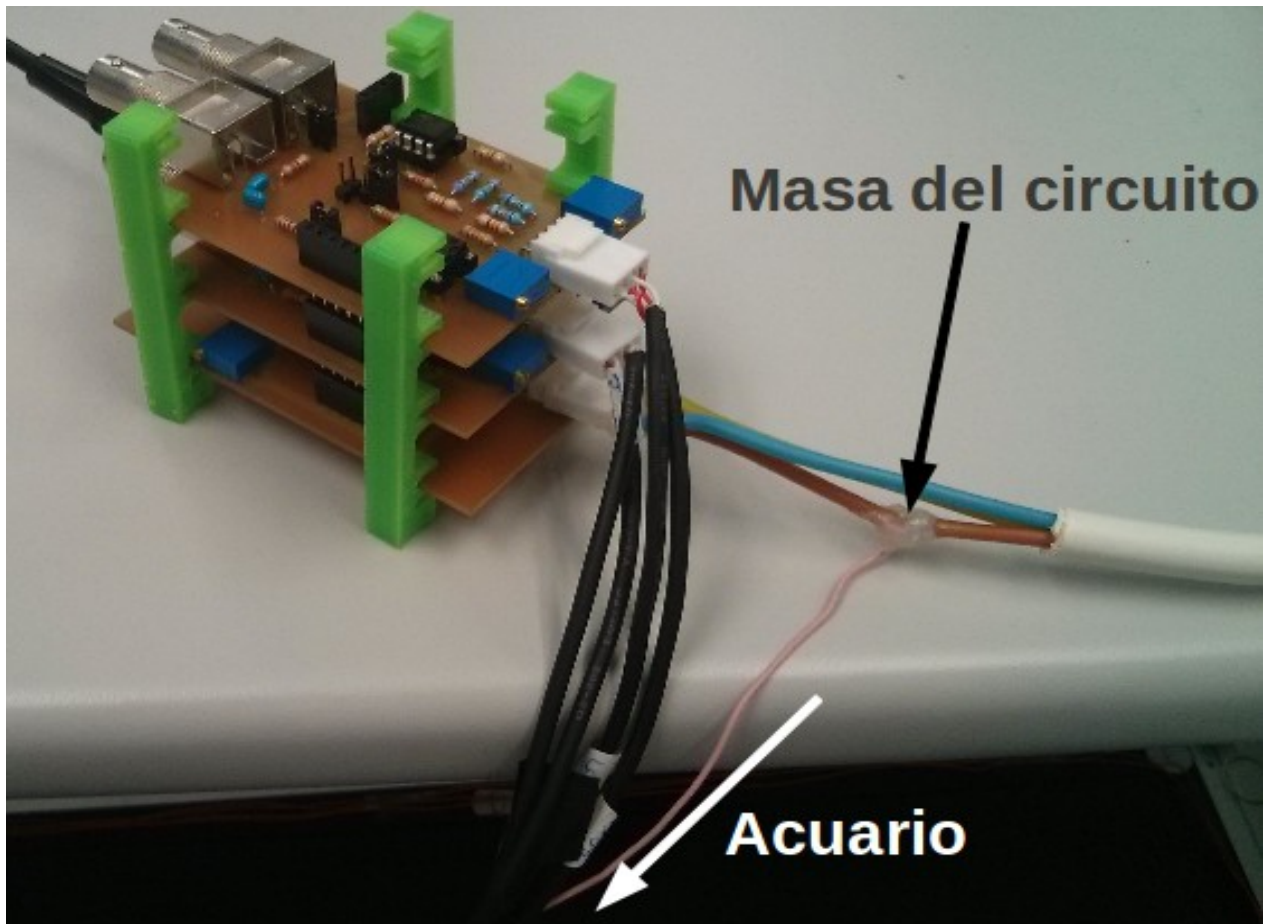


Figura 34: Conexión de la masa del circuito directamente al agua del acuario para eliminar el ruido producido por los componentes eléctricos.

Los resultados obtenidos tras la eliminación casi total del factor de ruido se pueden ver en las figuras 26, 27 y 38.

6 Comunicación unidireccional monitorizada entre peces de diferentes acuarios

6.1 Consideraciones acerca del Tiempo Real

El núcleo que hace posible el estudio y el procesamiento de los datos es el software ADCLAMP/RTBiomanager que permite el registro y estimulación en “Hard Real Time”, pero la única restricción que impone esta característica es que la tasa de muestreo es siempre la deseada sin tener en cuenta un parámetro que torna importante en el momento en el que se conecta en bucle: la latencia total. Aunque exista una frecuencia de muestreo válida, la latencia puede hacer inservible todo el conjunto si es demasiado grande, por ese motivo se realizaron medidas para comprobar que no fuese un problema.

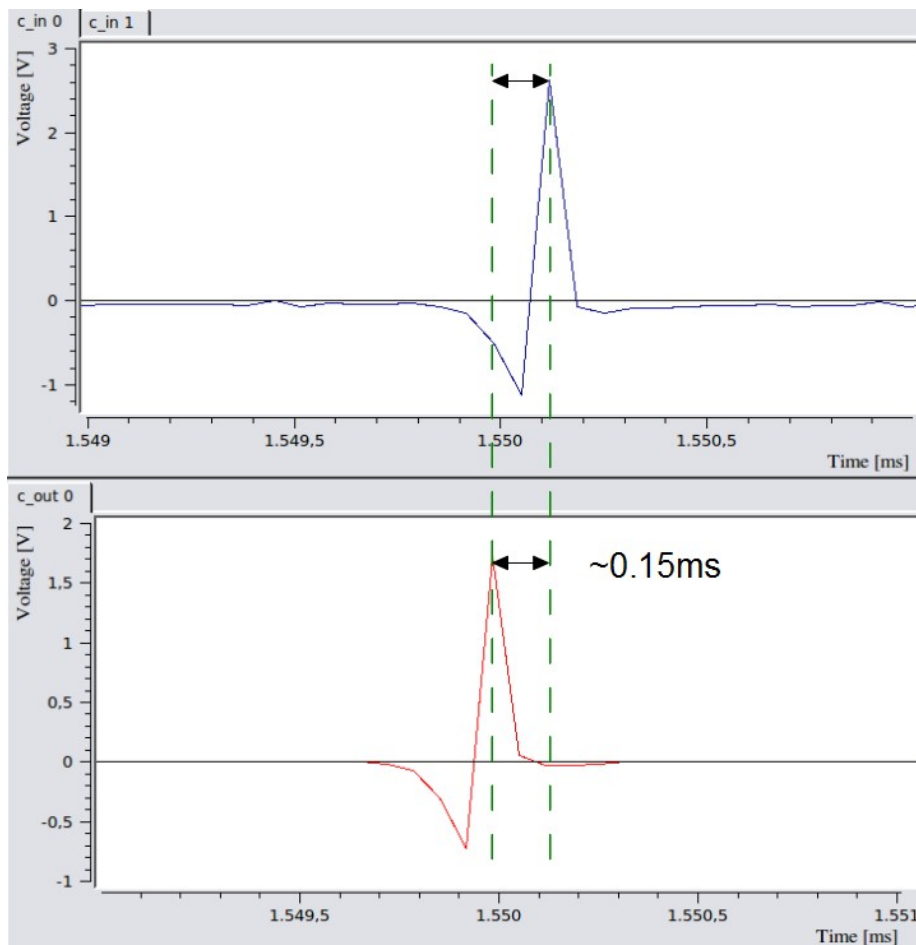


Figura 35: Captura para el cálculo del retardo introducido por el sistema completo. Muestreo de la señal realizado a 15KHz.

Comunicación unidireccional monitorizada entre peces de diferentes acuarios

La estimación más básica dice que el retardo total introducido por el sistema es de aproximadamente 0.15ms. Dada la precisión temporal que poseen los peces elefante, esta latencia es significativa de cara al estudio, debido a que este retardo no existe en el entorno natural y es del mismo orden de magnitud que el ancho del pulso emitido por los peces.

Aunque detectar este problema es trivial, su solución no lo es tanto dado que el retardo medido es inherente al sistema completo y depende de factores muy dispares que requerirían de un estudio pormenorizado. Por este motivo, este factor no se va a tener en cuenta en el desarrollo de este proyecto, aunque sí en futuros proyectos.

Para comprobar la validez de ambos setups de adquisición, se lleva a cabo la conexión entre acuarios. Para hacer uso del máximo posible de mejoras con respecto a al setup construido en la sección 3, se realizan los siguientes experimentos:

- Una estimulación artificial, generada de manera automática por ADClamp y realizada en el acuario con la distribución de dipolos previa (figura 36).

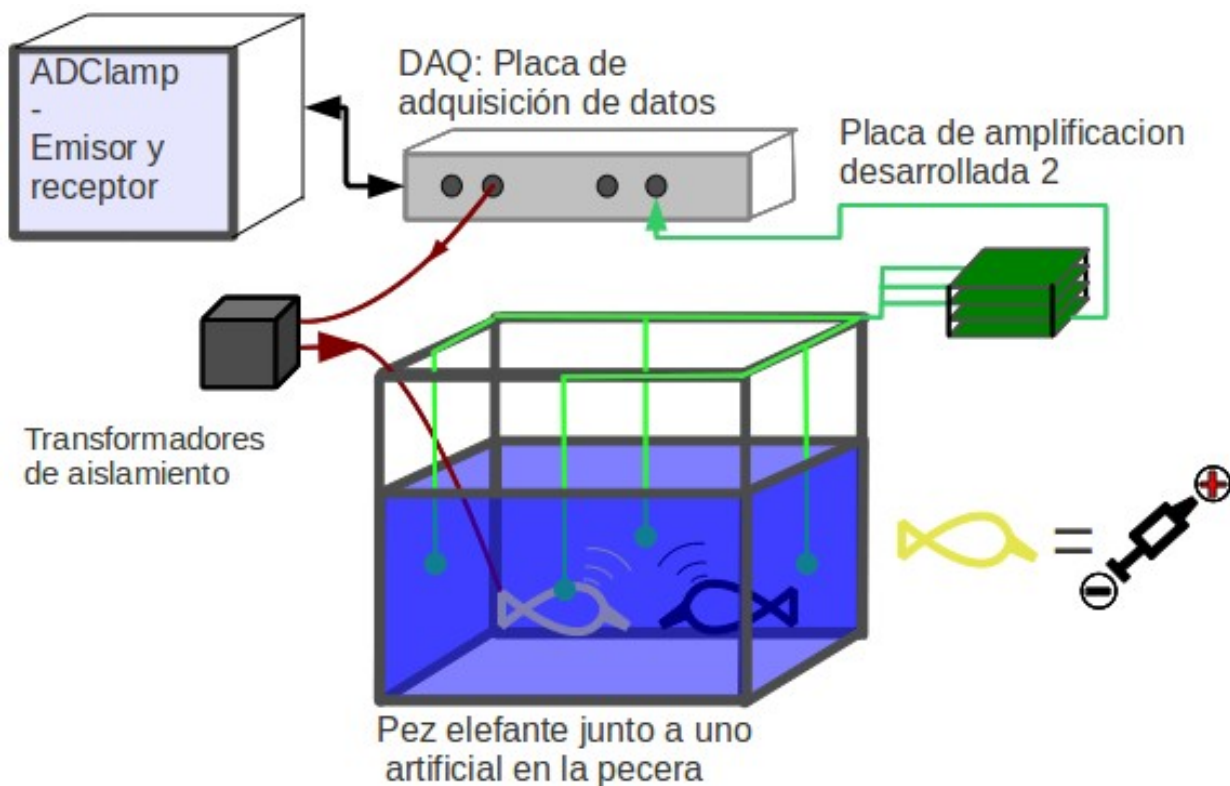


Figura 36: Esquema simplificado del experimento utilizando estimulación artificial. Nota: Para favorecer la claridad no se han incluido todos los dipolos presentes en el acuario.

- Una estimulación natural, en la que se detectan los pulsos de el pez de un acuario y se emiten en el otro (figura 37). En este segundo acuario se recoge la información y se analiza la respuesta del segundo pez.

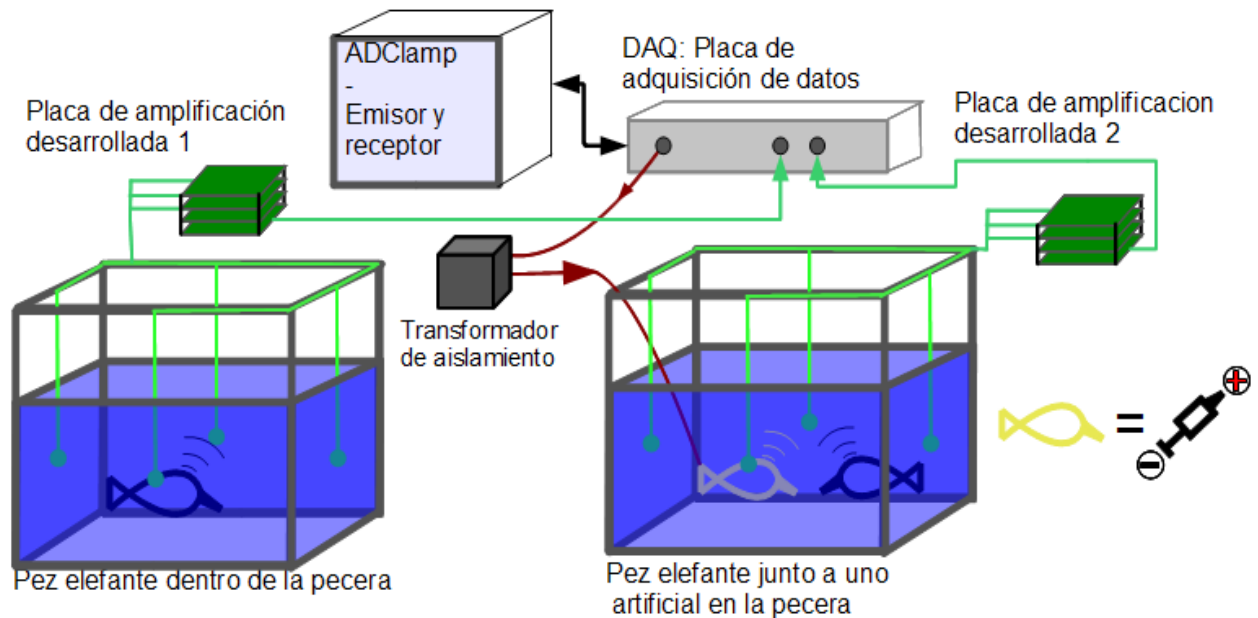


Figura 37: Esquema simplificado sobre el sistema cerrado completo, utilizando estimulación natural. Nota: Para favorecer la claridad no se han incluido todos los dipolos presentes en los acuarios.

Para la correcta interpretación de los resultados de ambos experimentos, es necesario un procesamiento de éstos.

1. En entornos en los que el pez no es estimulado (durante los controles), este procesamiento se realiza aplicando un umbral sobre la señal que se ha recibido. Cuando el umbral se ha superado, se genera una marca temporal del tiempo en el que se ha producido este pulso. Una vez se tiene el conjunto total de marcas de tiempo, se generan los histogramas como los de las siguientes figuras, donde el parámetro de medida son los IPIs, que se calculan como la diferencia entre estas marcas de tiempo.
2. En entornos donde el pez sí está siendo estimulado (figura 37) este procesamiento necesita también una fase previa de filtrado de datos. En el segundo experimento se procesa en tiempo real la información emitida por el pez elefante del acuario “emisor” y se realiza una detección de los pulsos que emite mediante el umbral mencionado antes. Una vez se ha detectado un pulso, se procede a emitir un pulso pre-grabado en el otro acuario con

Comunicación unidireccional monitorizada entre peces de diferentes acuarios

cierto retraso, introducido por el sistema (ver figuras 35 y 38). El problema que surge debido a esta emisión dentro del acuario es que la propia plataforma receptora recibe estos impulsos emitidos (como se puede observar en la figura 38). Si se calculasen los IPIs utilizando estas medidas, serían completamente erróneas puesto que nuestra propia emisión contamina la lectura que hacemos de los impulsos emitidos por el pez habitante del segundo acuario.

La solución de este problema es utilizar los tiempos de emisión de pulsos (o de detección del primer acuario) para eliminar los pulsos que aparecerán en las medidas del segundo acuario en esos instantes. De esta manera se conseguirá una señal pura de emisión del pez elefante, con la que se podrán ya obtener resultados válidos. Aunque la detección de pulsos se realiza en tiempo real, la resta de señales y cálculo de marcas de tiempo se realiza de manera posterior al experimento, así como la generación de histogramas. Este tipo de procesado ha sido el utilizado en las pruebas realizadas correspondientes a las figuras 39, 40, 41 y 42.

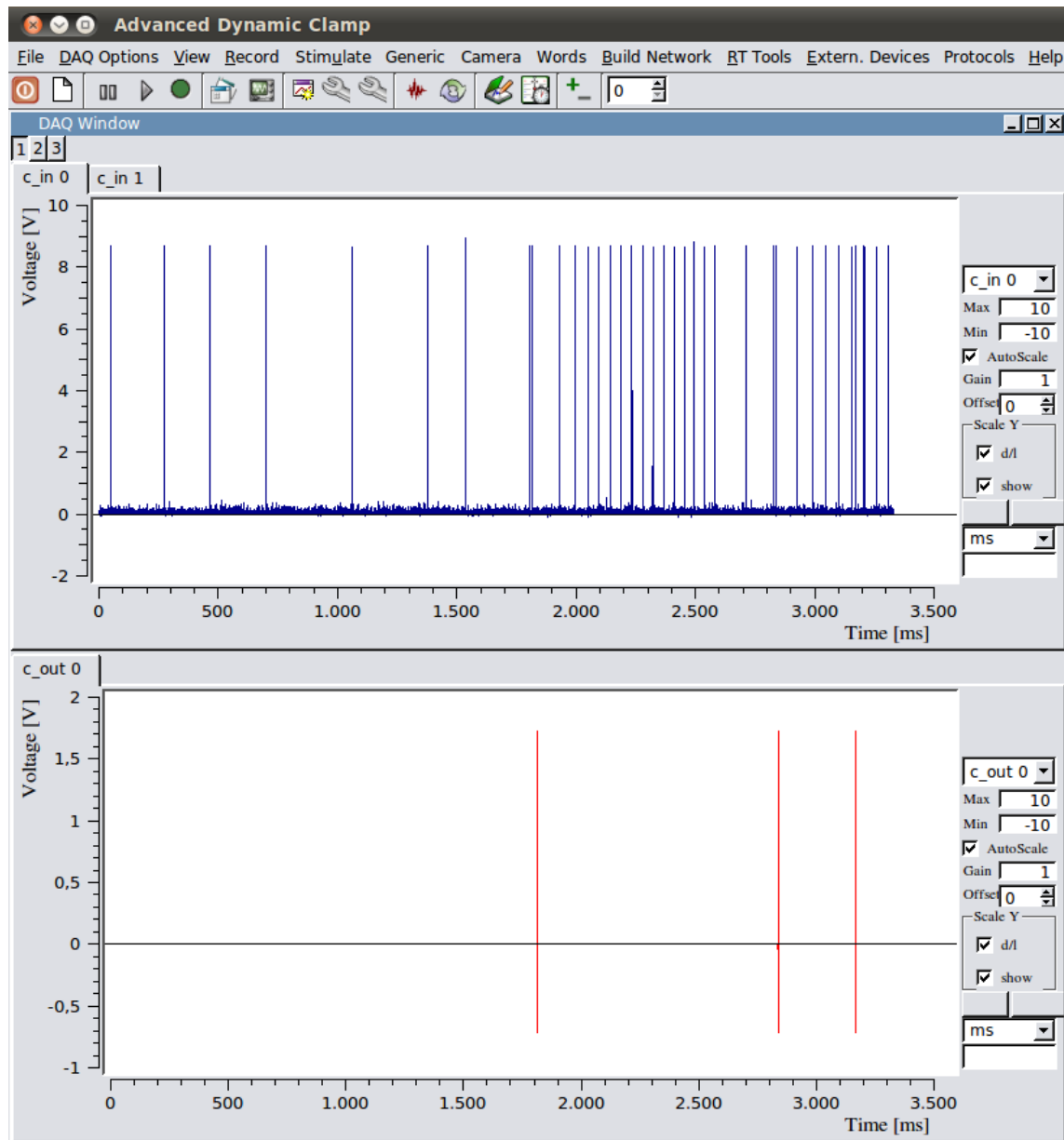
3. En el caso de la comunicación bidireccional entre acuarios (figura 37), los impulsos emitidos por uno de los peces son replicados en el otro acuario, y lo mismo sucede en la dirección contraria. Como se están utilizando para estimular en tiempo real impulsos naturales que están mezclados con los artificiales, es necesario filtrarlos para evitar un proceso de realimentación inestable que sature el sistema, debido a una replicación infinita.

Para resolver este problema es estrictamente necesaria una implementación en real time que procese los tiempos de emisión y filtre estas señales, de tal manera que el sistema, aunque realice una lectura en la que pueda ver sus propias emisiones, también las reconozca como suyas y no las tenga en cuenta de cara a la emisión en la otra pecera. Todo este proceso hay que realizarlo en ambos sentidos y es algo que todavía no está implementado en el software ADDClamp/RTBiomanager.

Como requisito previo, además hay que adaptar este software para la tarea que conlleva este sistema de emisión por canales de salida distintos de señales distintas.

Comunicación unidireccional monitorizada entre peces de diferentes acuarios

En los resultados que se muestran a continuación, los experimentos que se han realizado (figuras 36 y 37) han sido repetidos para un pez emisor artificial en las configuraciones “Grande” y “Pequeño” (ver figura 23). De esta manera se pretende estudiar los efectos que pueda tener el tamaño del pez emisor en el comportamiento o la respuesta del pez elefante, capaz de detectar esta información.



*Figura 38: Interfaz de ADCLamp/RTBiomanager durante una estimulación con pulsos de *Gnathonemus petersii* sobre el acuario adaptado nuevo. Debajo, en rojo, el canal de emisión con los pulsos emitidos por el pez artificial. Arriba, en azul, los pulsos recibidos procedentes del acuario (sin filtrar los emitidos por el propio sistema). Se puede observar como el comportamiento en la emisión cambia radicalmente ante la llegada de un pulso externo. También se puede apreciar el nivel alto de SNR tras la corrección realizada en la sección 5.2. El muestreo ha sido realizado a 15KHz.*

Estimulación artificial

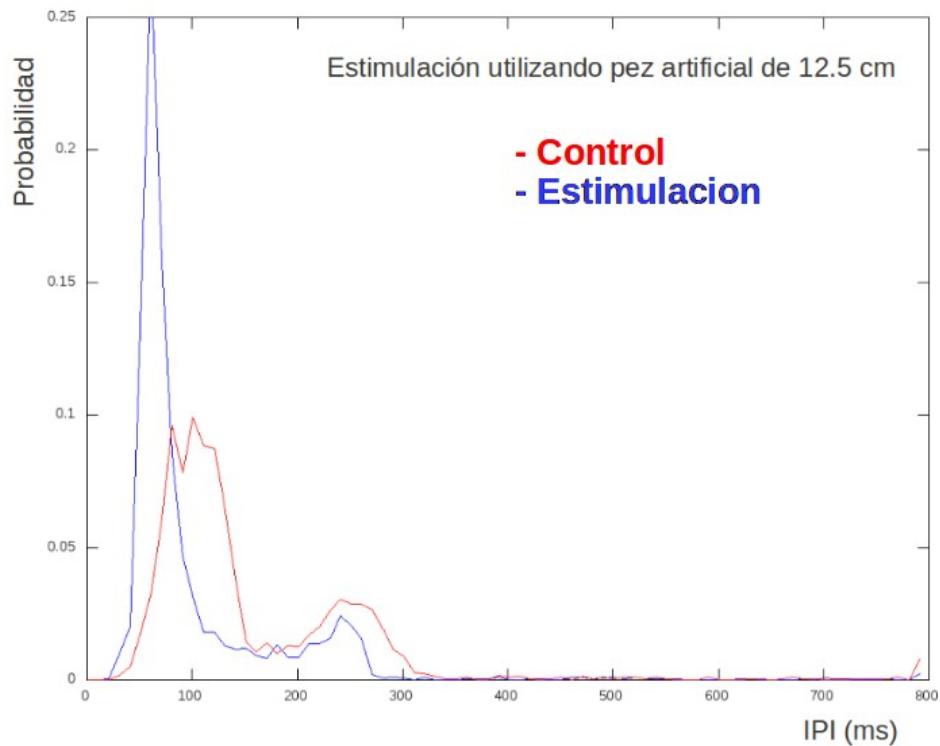


Figura 39: Estimulación artificial. Resultados obtenidos utilizando un pez artificial pequeño de 12.5cm.

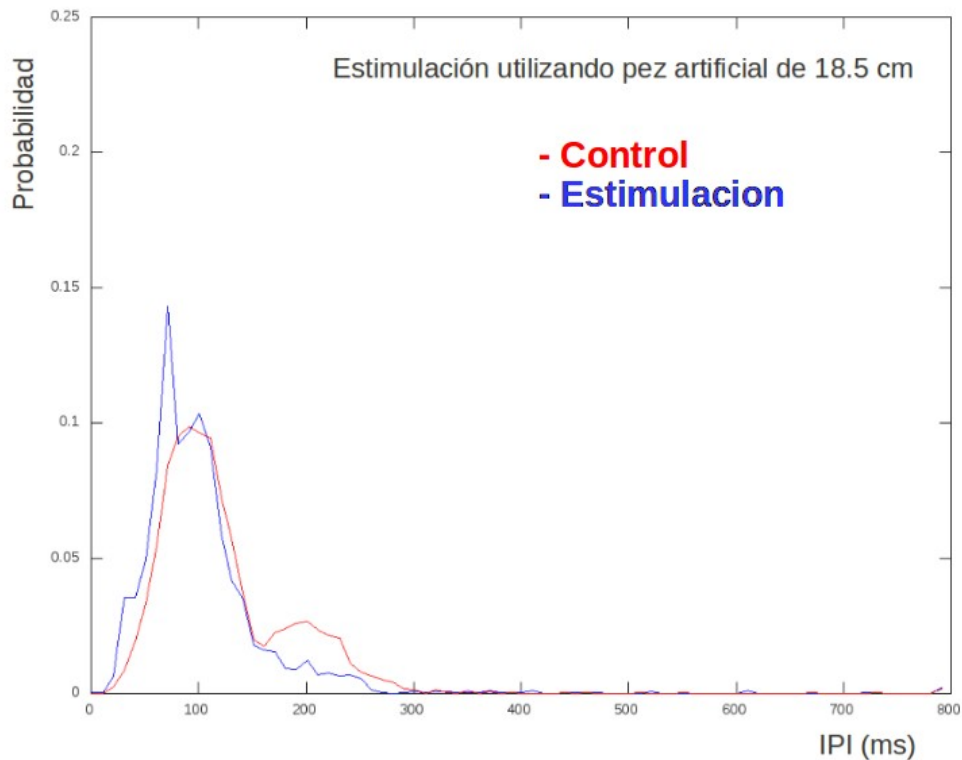


Figura 40: Estimulación artificial. Resultados obtenidos utilizando un pez artificial emisor grande de 18.5cm.

Estimulación natural

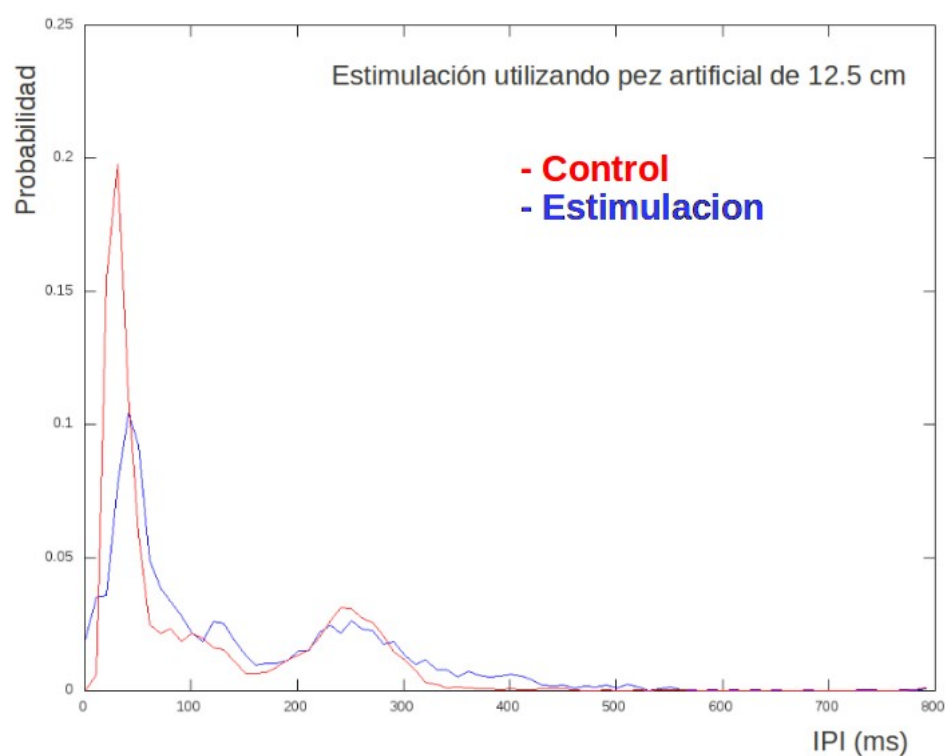


Figura 41: Estimulación natural: Resultados obtenidos utilizando un pez artificial pequeño de 12.5cm.

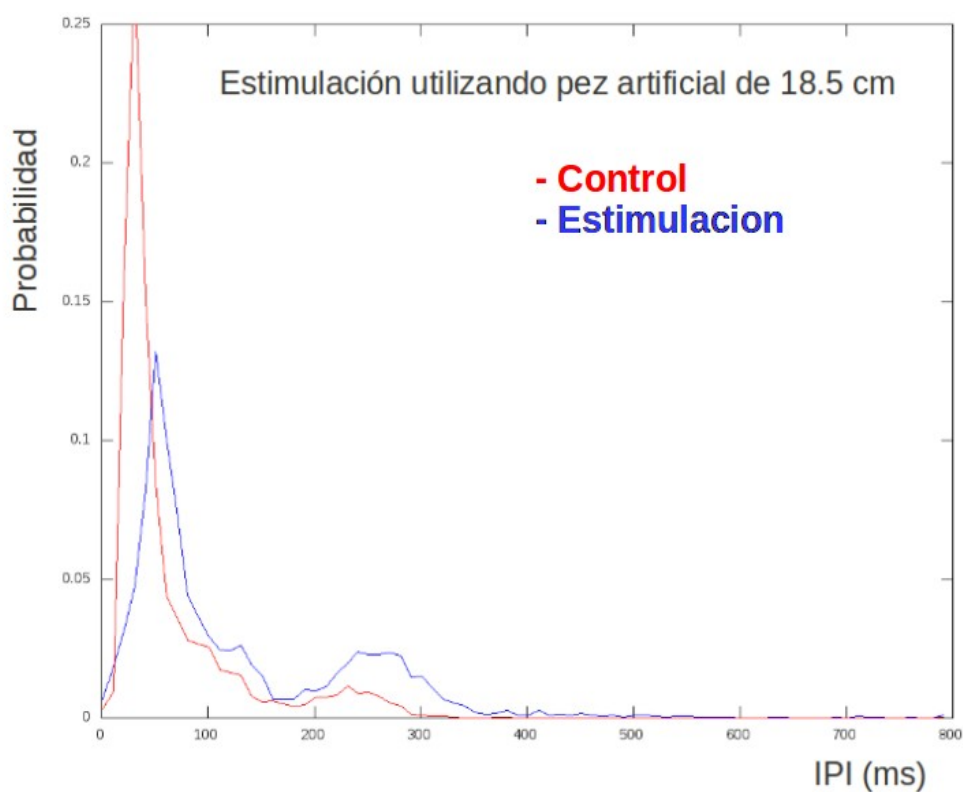


Figura 42: Estimulación natural: Resultados obtenidos utilizando un pez artificial grande de 18.5cm.

Comunicación unidireccional monitorizada entre peces de diferentes acuarios

Aunque el objetivo de estos experimentos no es encontrar ningún tipo de relación conductual en el pez sino la pura demostración de que el sistema funciona y es utilizable de cara al estudio, en las gráficas mostradas se puede ver que sí se establecen ciertas relaciones.

En las figuras 39 y 40 se muestran los resultados tanto del control como de la fase de estimulación para el individuo de pez elefante situado en el acuario más grande. Durante este experimento el pez fue estimulado con pulso genérico producido por esta especie (figura 33). Esta estimulación se disparaba de manera automática 5ms después de recibir un impulso por parte del pez residente en el mismo acuario. La diferencia entre ambas figuras es el modo de utilización del pez artificial. En la 39 se utiliza con unas dimensiones de 12.5cm mientras que para la 40 son de 18.5cm.

- Para la estimulación con 12.5cm de pez emisor se aprecia un cambio significativo en la distribución del histograma entre el control y la prueba. El ratio temporal de estimulaciones aumenta considerablemente y aparece un pico en IPIs más pequeños, que se puede asociar a los relacionados con los procesos de comunicación.
- En el caso de la estimulación con 18.5cm, la distribución sufre cambios con respecto al control, aunque son más sutiles que en el caso anterior. En esta prueba ha habido una disminución en los IPIs mayores para concentrarse más en los pequeños, que acumulan mayor probabilidad que durante el control, apreciándose con claridad en un pequeño escalón en los más bajos de todos, sobre los 40ms.

En las figuras 41 y 42 se muestran los resultados de unas pruebas distintas. En este caso el pez fue estimulado utilizando un estímulo producido de manera natural por otro individuo desde otro acuario. Tal y como se muestra en la figura 36, desde un acuario en el que solo se leen los dipolos, se detectan los impulsos emitidos por su pez y se emiten usando el pez artificial en el otro acuario. Tras filtrar los pulsos que se emiten por el pez artificial para la lectura del segundo acuario, se procede a generar los histogramas de IPIs que corresponden a las figuras 41 y 42.

- En ambas figuras se ve como el cambio en la distribución de IPIs es similar entre el control y la prueba, aunque en ambos casos es significativamente distinto al comportamiento con una estimulación artificial dependiente del propio pez. En estas gráficas se hace mas homogénea, reduciéndose los picos aparecidos en ambos casos en

Comunicación unidireccional monitorizada entre peces de diferentes acuarios

bajas frecuencias durante el control (lo que podría indicar que el pez estaba en un estado de intranquilidad durante los mismos). Este comportamiento podría estar motivado por el hecho de que en estos dos experimentos con la estimulación proveniente de otro pez, el pez “emisor” no está siendo estimulado y es un lazo abierto. Se entiende que esto crea en el pez cierta sensación de aleatoriedad en los impulsos recibidos, cosa que no sucede en el primer caso, en el que era estimulado directamente en función de lo que el mismo pez emitía.

7 Conclusiones y trabajo futuro

A continuación se va a repasar la lista de objetivos para comentar cuales han sido los resultados finales de este trabajo:

- Objetivo N°1: Se ha construido un setup de adquisición funcional (como se puede ver en la sección 3) que ha demostrado ser mucho más resistente que el prototipo al que sustituye. Este setup se ha diseñado modular y utilizando software de libre distribución. Además, se han implementado una serie de mejoras adicionales en cuanto a funcionalidad que hacen esta plataforma mucho más cómoda de utilizar.
- Objetivo N°2: Como se relata en el capítulo 4, el pez artificial ha sido construido y verificado sin mayor problema, proveyendo de un sistema estimulador más verosímil y con la opción a ser modificado en tamaño para la realización de futuras pruebas en las que las dimensiones del emisor puedan ser críticas.
- Objetivo N°3: Se ha construido un segundo setup de adquisición cuya validez se puede ver en la sección 6. Este sistema utiliza el mismo diseño que el primer setup, pero utiliza una configuración distinta, debido a los nuevos requisitos del segundo acuario. Al validar este segundo setup en condiciones distintas se está confirmando las propiedades de flexibilidad y versatilidad del setup. Además, se ha adaptado un segundo acuario con un conjunto de dipolos que permiten su uso para registrar la actividad del pez elefante.
- Objetivo N°4: Tras validar el funcionamiento de ambos setups de adquisición por separado se ha realizado una conexión unidireccional entre ambos acuarios y se ha registrado la actividad de los peces elefante en dichos acuarios. Gracias a estas pruebas se puede aseverar que el sistema funciona y es perfectamente utilizable para la realización de experimentos que requieran un sistema más robusto.
- Objetivo N°5: Se buscaba la conexión de ambos acuarios de manera bidireccional como se muestra en la figura 43, pero este tipo de conexión tenía implícita una nueva dificultad: para poder realizar esta conexión, el software ADDCLAMP/RTBiomanager debe estar preparado para varias nuevas tareas, como se explica más detenidamente en la sección 6.
 - El procesamiento de la señal ligeramente más complejo, pues se necesita filtrar los mensajes emitidos por el propio sistema o de otra forma el sistema tendrá un efecto de

Conclusiones y trabajo futuro

realimentación infinito que hará al sistema inestable y saturar. Hasta ahora este tipo de problemas se solventaba de manera offline en un proceso simple de post-procesado pero debido a las implicaciones de cerrar el círculo de comunicación, este procesado se deberá hacer en tiempo real, y esto representa una dificultad mucho mayor.

- Adaptar el software ADCLAMP/RTBiomanager para ser capaz de procesar la información recibida a través dos canales distintos para la actuación por dos canales emisores de manera independiente.

Además de estos requisitos previos, existe una cuestión cuya solución es digna de un estudio detallado. Al emitir señales utilizando los peces artificiales, se puede eliminar en la recepción aquello que hemos emitido para obtener únicamente la señal emitida por el pez. Pero en el caso en el que el pez vivo emite un pulso simultáneo al del artificial, es imposible detectarlo utilizando las técnicas de procesado que se emplean en estos momentos. Para solucionar esta pérdida de información vital, es necesario poder detectar variaciones en la amplitud de estos pulsos, y para ello las soluciones más sencillas emplearán las señales del setup correspondientes a los dipolos individuales, que sí permiten realizar esta labor.

Como se puede ver, las soluciones requeridas para este problema por tanto suponen un volumen de trabajo demasiado grande para incluirlas dentro de este TFG y por tanto se ha decidido mantenerlas al margen, y dejarlas enunciadas para una futura resolución.

En resumen, se ha construido un setup de adquisición de datos basado en el prototipo construido por el Grupo de Neurocomputación Biológica que proporciona robustez, es reconfigurable y muy versátil. Esta versatilidad se hace manifiesta en el mismo trabajo, dado que los dos acuarios que han sido utilizados han requerido distintas configuraciones.

El resultado del trabajo ha sido positivo, consiguiendo dos setups que funcionan correctamente en cualquiera de sus configuraciones y además introducen menos ruido en las medidas realizadas que el prototipo utilizado anteriormente.

Los últimos experimentos realizados con dos acuarios para verificar el correcto funcionamiento del sistema completo abren las puertas a muchas líneas de trabajo e investigación en el laboratorio.

En la dirección del entendimiento en los procesos de comunicación y el desarrollo del software se ha abierto la posibilidad de adaptar el software ADCLAMP para permitir la emisión por canales distintos de información distinta y así poder analizar la comunicación entre los individuos en modo bidireccional.

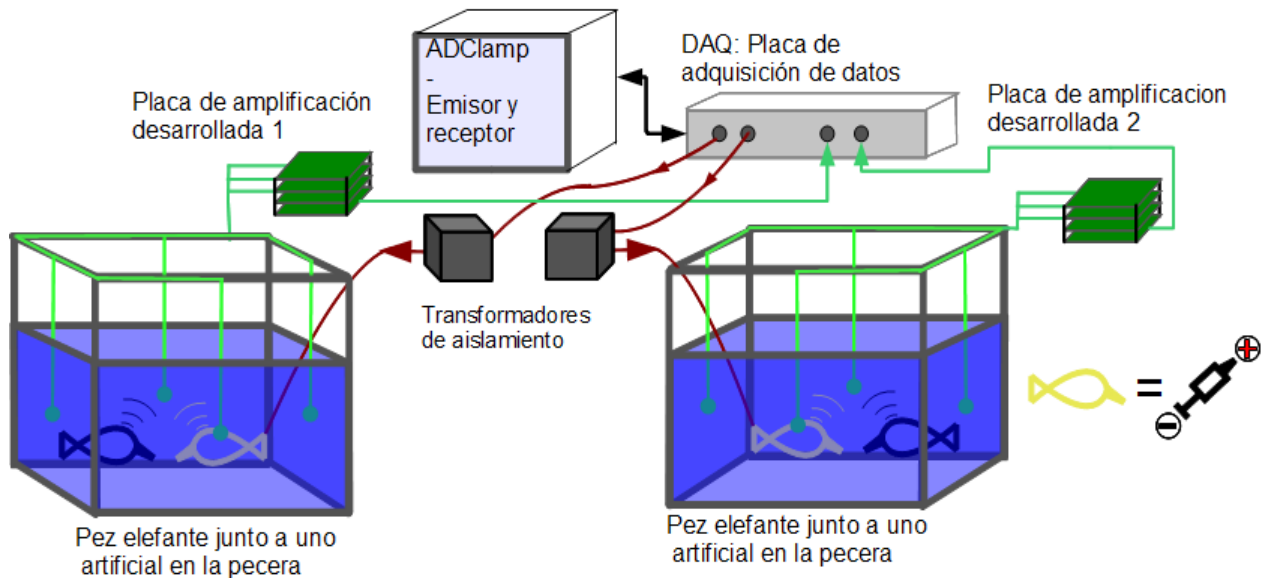


Figura 43: Estimulación natural bidireccional monitorizada

En otra línea de trabajo distinta, como se indica en la sección 4.1, existe un inconveniente en el uso de un estimulador en un sistema como el del laboratorio y es la introducción de una latencia en el sistema, que puede ser muy significativa en el estudio del pez elefante. El desarrollo de un DSP dedicado al procesado y estimulación del pez en tiempo real es una vía muy interesante y puede resultar perfecta de cara a la realización de un Trabajo de Fin de Máster.

Referencias

- [1] B.Kramer, “Electro-communication in teleost fishes”, 1990.
- [2] Theodore H. Bullock, Carl D. Hopkins, Arthur N. Popper, Richard R. Fay (eds.), “Electroreception”, 2005.
- [3] Marielle Thomas, André Florion, Didier Chrétien, Denis Terver, “Real-time biomonitoring of water contamination by cyanide based on analysis of the continuous electric signal emitted by a tropical fish: *Apteronotus albifrons*”, *Water research Magazine*, Volumen 30, Edición 12, Páginas 3083–3091, Diciembre 1996.
- [4] Frédéric Boyer, Pol Bernard Gossiaux, Brahim Jawad, Vincent Lebastard, and Mathieu Porez, “Model for a sensor Inspired by Electric”, *IEE Transactions on robotics*, Vol. 28, Num. 2, Abril 2012.
- [5] Dominic Clarke, Heather Whitney, Gregory Sutton, Daniel Robert, “Detection and Learning of Floral Electric Fields by Bumblebees”, *Science Magazine*, Vol 340, Num. 6128, pages 66-69, 5 Abril, 2013.
- [6] A A Caputi, R Budelli, K Grant and C C Bell, “The electric image in weakly electric fish: physical images of resistive objects in *Gnathonemus petersii*”, *The Journal of Experimental Biology*, Volumen 201, pages 2115–2128, 1998.
- [7] Stephen M. Kajiura and Kim N. Holland, “Electroreception in juvenile scalloped hammerhead and sandbar sharks”, *The Journal of Experimental Biology* volumen 205, paginas 3609–3621, 2002.
- [8] Bernd Kramer, “Electroreception and communication in fishes”, *Revista Progress in Zoology*, volumen 42, 1996.

Referencias

- [9] Ana Carolina Pereira, Angel Ariel Caputi, “Imaging in Electrosensory Systems”, *Interdiscip Sci Comput Life Sci*, Vol 2, pags 291-307, 2010.
- [10] Carl D. Hopkins , “Neuroethology of electric communication ”, *Ann. Rev. Neurosci.*, pags. 497-535 Noviembre 1988.
- [11] Gerhard Von Der Emde, “Active electrolocation of objects in weakly electric fish”, *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 202, pags. 1205-1215, 1999.
- [12] Caroline García Forlim, Lirio O B Almeida, Pablo Varona, Francisco De Borja Rodríguez, Reynaldo Daniel Pinto, “Study of electric and motor behaviour in weakly electric fish, *Gymnotus carapo* and *Gnathonemus Petersii*, using Information Theory”, 2012.
- [13] Carlos Muñiz, Sara Arganda, Francisco de Borja Rodríguez, Pablo Varona and Gonzalo G. de Polavieja, “Realistic Stimulation Through Advanced Dynamic-Clamp Protocols”, 2005.
- [14] Carlos Muniz, Rafael Levi, Meriem Benkrid, Francisco B. Rodríguez, Pablo Varona , “Real-time control of stepper motors for mechano-sensory stimulation” , *Journal of Neuroscience Methods*, Vol. 172, pags. 105-111, 2008.
- [15] Gerhard von der Emde, “Discrimination of objects through electrolocation in the weakly electric fish, *Gnathonemus Petersii*”, *Journal of comparative physiology*, Vol 167, pags. 413-421, 1990.
- [16] www.ti.com
- [17] Stephan Schwarz, Gerhard von der Emde , “Distance discrimination during active electrolocation in the weakly electric fish *Gnathonemus petersii*”, *Journal of comparative physiology*, Vol 186, pags. 1185-1197 , 1990.
- [18] Gerhard von der Emde, “Active electrolocation of objects in weakly electric fish”, *The Journal of Experimental Biology*, Vol.202, pags. 1205–1215, 1999.

- [19] Cain, P., Gerin, W. and Moller, P, “Short-range Navigation of the Weakly Electric Fish, *Gnathonemus petersii* L. (Mormyridae, Teleostei), in Novel and Familiar Environments”, Volume 96, Issue 1, pages 33–45, January-December 1994.
- [20] Gerhard von der Emde and Horst Bleckmann, “Finding food: senses involved in foraging for insect larvae in the electric fish *Gnathonemus Petersii*”, The Journal of Experimental Biology, Vol. 201, pages. 969–980, 1998.
- [21] Alain Destexhe I, Thierry Bal “Dynamic-Clamp , From Principles to Applications” ,Ed Springer, 2009.
- [22] Caroline Garcia Forlim, Reynaldo Daniel Pinto, Pablo Varona, Francisco B. Rodríguez, “Delay-dependent response in weakly electric fish under closed-loop pulse stimulation”, 2014.
- [23] Caroline Garcia Forlim, “Estudo da eletrocomunicação em *Gymnotus carapo* e *Gnathonemus petersii* livres por tempos longos mediante protocolos realistas de estimulação”, 2013 – Enviado.
- [24] [KiCAD EDA Software Suite](#)
- [25] [TL082 JFET-Input dual Operational Amplifier](#)
- [26] [LM741 Operational Amplifier](#)
- [27] [AD633: Low cost analog multiplier](#)
- [28] [LPKF ProtoMat® S100](#)
- [29] David Babineau, André Longtin and John E. Lewis, “Modeling the electric field of weakly electric fish”, The Journal of Experimental Biology, Vol. 209, pages. 3636-3651, 2006.

Referencias

- [30] Kramer, B., 1979, "Electric and Motor responses of the Weakly electric fish, *Gnathonemus petersii* (Mormyridae), to play-back of social signals", *Behav. Ecol. Sociobiol.*, 6(1), pags. 67– 79.
- [31] Teyssedre, C., and Serrier, J., 1986, "Temporal spacing of signals in communication, studied in weakly-electric mormyrid fish (teleostei, pisces)," *Behav. Processes*, 12(1), pags. 77–98.
- [32] Baker, C. a, Kohashi, T., Lyons-Warren, A. M., Ma, X., and Carlson, B. a, 2013, "Multiplexed temporal coding of electric communication signals in mormyrid fishes.," *J. Exp. Biol.*, 216(Pt 13), pags. 2365–2379.

Presupuesto

Diseño, construcción y montaje del Setup amplificador

Compra de componentes eléctricos (anexo E).....	290€
Repuesto de plástico PLA para la impresora 3D.....	20€
Compra de un ordenador.....	500€
Material de oficina.....	20€
Licencias para KiCAD y FreeCAD.....	0€

Gastos de oficina

Impresión y encuadernación.....	10.40€
---------------------------------	--------

Gastos relacionados con los Peces elefante

Adquisición de los ejemplares de Gnathonemus Petersii.....	35€
Alimentación y mantenimiento de los acuarios.....	50€

Total Presupuesto.....	925,40 €
-------------------------------	-----------------

Anexos

A) Esquemáticos

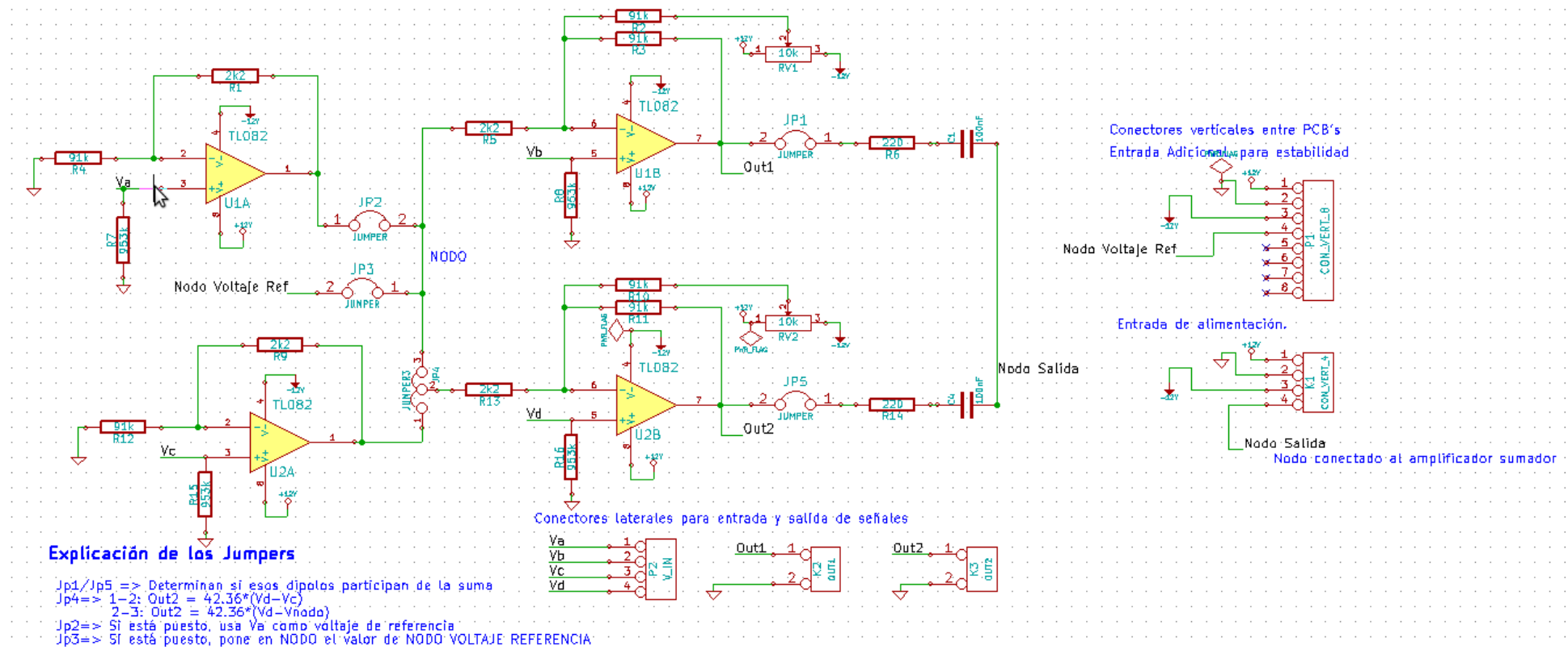
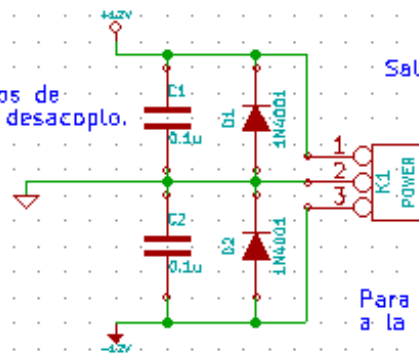


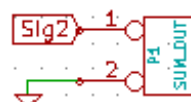
Figura 44: Captura del esquemático en KiCAD. Placa 1, Módulo apilable.

Conexiones horizontales de alimentacion y de señales

Conexión a la fuente, con diodos de protección y condensadores de desacoplo.

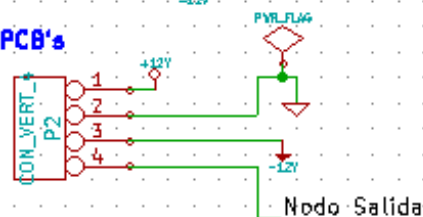


Salida de la señal suma

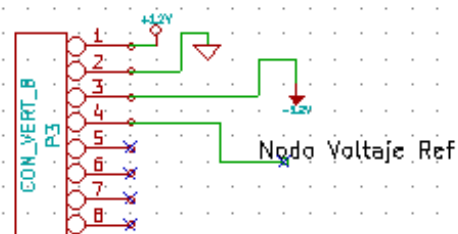


Para eliminar el ruido habrá que conectar masa a la pecera para eliminar el ruido de 50hz

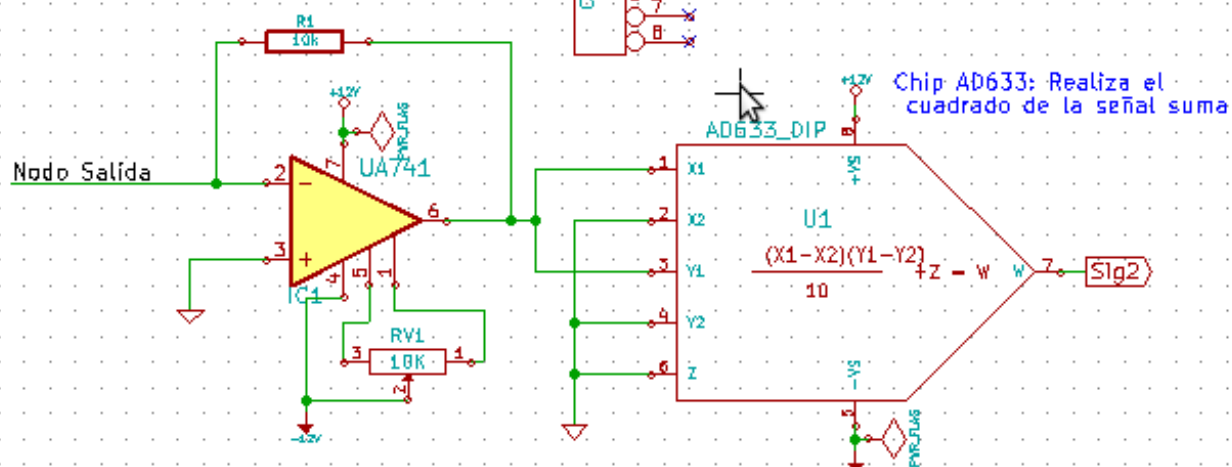
Conectores verticales entre PCB's



Nodo Salida



Nodo Voltaje Ref



Amplificador sumador, el Nodo salida conecta todos los sumandos,

Figura 45: Captura del esquemático en KiCAD. Placa 2, Módulo Base.

B) Funcionalidad implementada: Selección entre distintos voltajes de referencia

Para realizar una configuración adecuada del setup de adecuación se muestra a continuación una tabla con la función de cada uno de los jumpers. De cara a una correcta utilización, se recomienda comprobar en los esquemáticos proporcionados la conexión que se vaya a realizar.

Jumper	Función
Jp1	Determina si el valor leído en Out 1 participa en la suma al cuadrado
Jp2	Si está en ON, se utiliza V_a como voltaje de referencia
Jp3	Si está en ON, conecta “NODO VOLTAJE REF” a “NODO”. Ver esquemático 1.
Jp4	Si su posición es [1-2] el voltaje de referencia empleado en Out 2 será V_c . En caso de que su posición sea [2-3] la referencia empleada será NODO
Jp5	Determina si el valor leído en Out 2 participa en la suma al cuadrado

Tabla 1: Descripción de los Jumpers de configuración

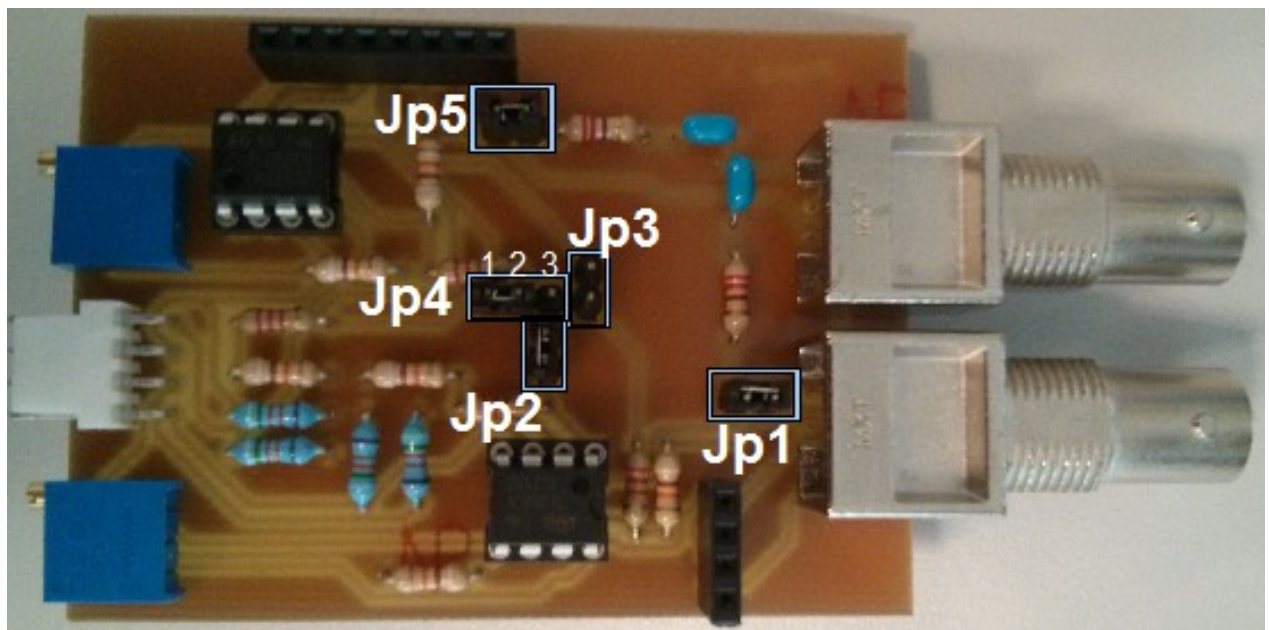


Figura 46: Detalle de los jumpers en el módulo apilable.

Ejemplos de utilización

El caso utilizado en el laboratorio. Todos los voltajes de referencia independientes y sumados en el módulo base.

En todos los módulos apilables:

Jumper	Posición
Jp1	ON
Jp2	ON
Jp3	OFF
Jp4	[1-2]
Jp5	ON

Tabla 2: Ejemplo de utilización 1

Todos los voltajes de referencia comunes al mismo, pero sólo teniendo en cuenta para la suma al cuadrado los dipolos obtenidos correspondientes a OUT 2

En la placa de la cual se quiera obtener el voltaje de referencia.

Jumper	Posición
Jp1	OFF
Jp2	ON
Jp3	ON
Jp4	[2-3]
Jp5	ON

Tabla 3: Ejemplo de utilización 2, configuración de la placa de la cual se quiera obtener el voltaje de referencia como V_a .

En el resto de placas.

Jumper	Posición
Jp1	OFF
Jp2	OFF
Jp3	ON
Jp4	[2-3]
Jp5	ON

Tabla 4: Ejemplo de utilización 2, configuración del resto de placas.

C) Diseño de una pieza en 3D para utilizarla como soporte de la plataforma de amplificación.

Al construir el setup de adquisición (ver figura 19) se comprobó que no era completamente estable, y que para evitar los problemas que podía introducir el utilizarla colocada directamente contra una superficie, había que añadirle unos soportes verticales que realizaran esta labor.

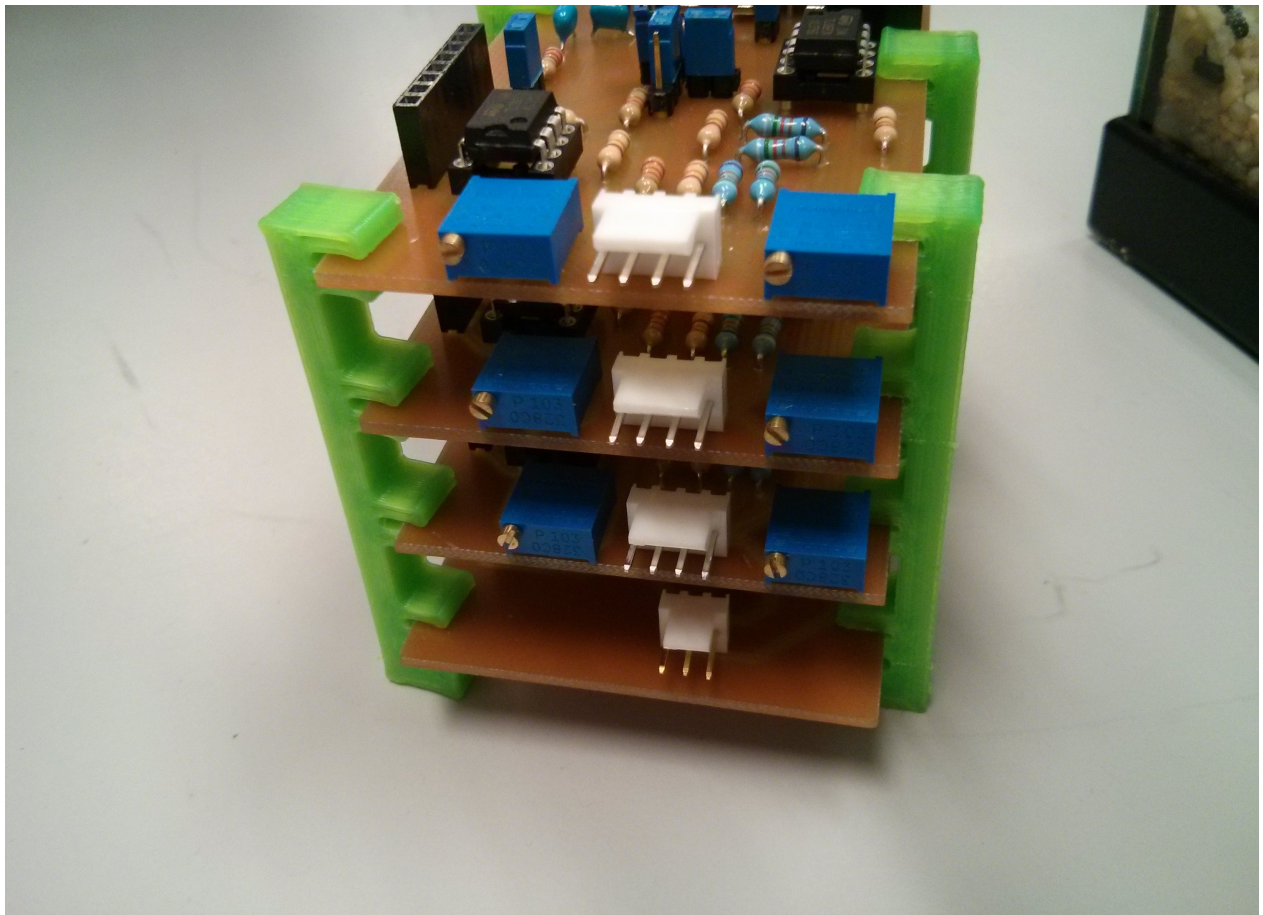


Figura 47: Detalle de los soportes verticales de PLA en el setup número 2.

Utilizando la plataforma de distribución libre FreeCAD se diseñaron un par de piezas que realizaran esta labor. Utilizando la Impresora 3D disponible en el laboratorio y con la inestimable ayuda de Carlos García Saura, se fabricaron utilizando como material plástico PLA.

A continuación se muestran documentos gráficos con la impresora utilizada, los diseños y resultados de la integración de estas piezas.

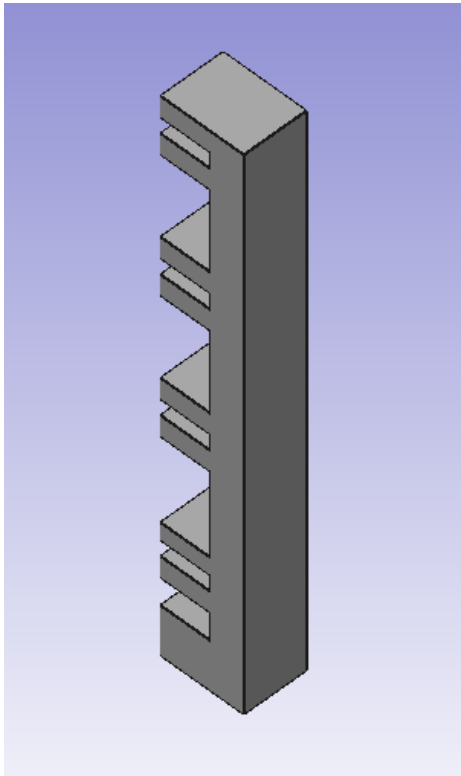


Figura 49: Soporte vertical visto en FreeCAD. Pieza lateral.

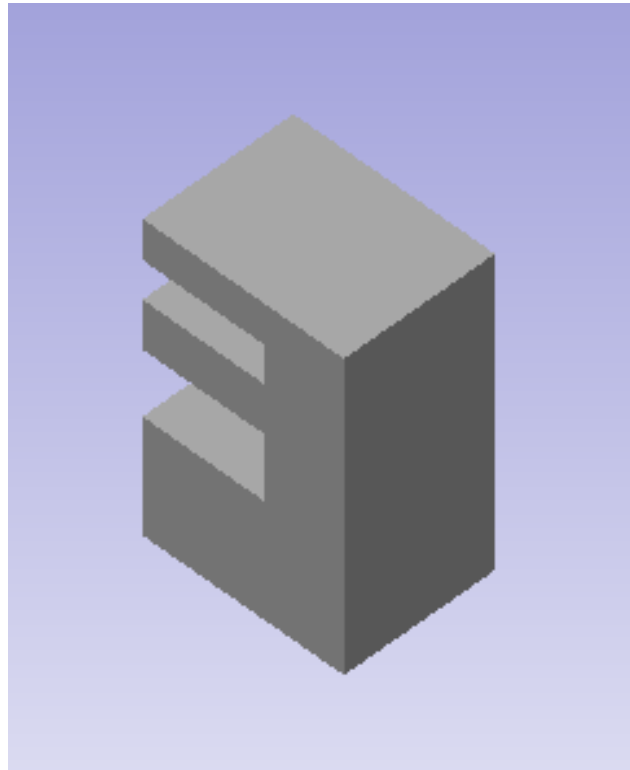


Figura 48: Soporte vertical visto en FreeCAD. Pieza frontal

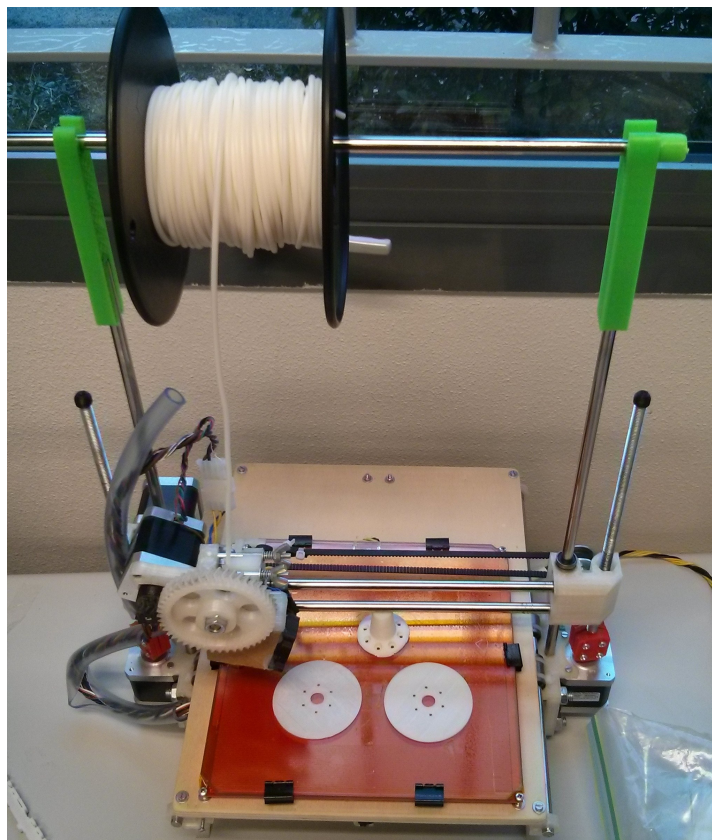


Figura 50: Impresora 3D.

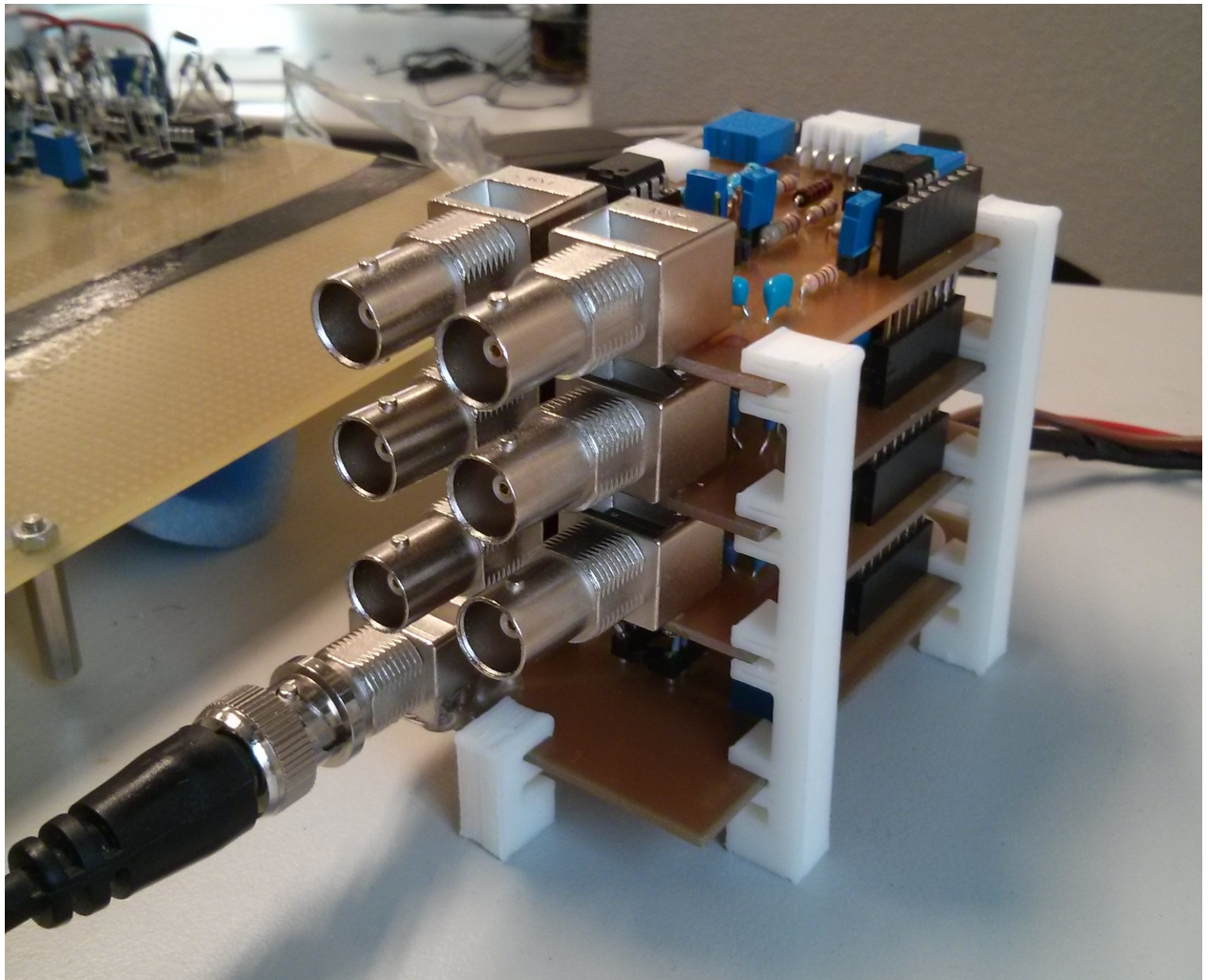


Figura 51: Setup utilizado para el acuario número 1. Se pueden ver los soportes laterales y frontal.

D) Cables y conexión de los dipolos a los conectores tipo MOLEX KK y al acuario.

Para conseguir una recepción de los impulsos emitidos por el pez que sea válida y fiable, se necesita:

- Una conexión fiable y segura de los dipolos al setup. Para conseguir esta conexión se ha empleado un cable bipolar blindado y conectores MOLEX KK que permiten una rápida conexión y desconexión.
- Una distribución de los dipolos adecuada dentro del acuario, y que éstos estén correctamente colocados y fijados, así como aislados para prevenir la oxidación del cobre que compone los cables. Para aislar el cobre y dejar la plata al descubierto, la unión ha sido soldada para asegurar conectividad y después recubierta con pegamento termofusible. Para fijar los dipolos al interior de la pecera, se ha procedido a vaciar la pecera, limpiarla y colocarlos sobre el cristal usando termofusible. En la figura 54 se puede ver el resultado final de la colocación de los dipolos sobre el acuario.

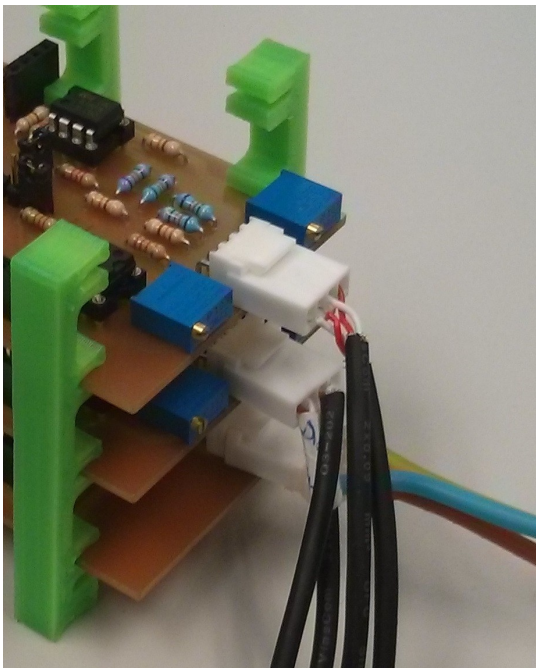


Figura 53: Detalle de la conexión de los conectores MOLEX.

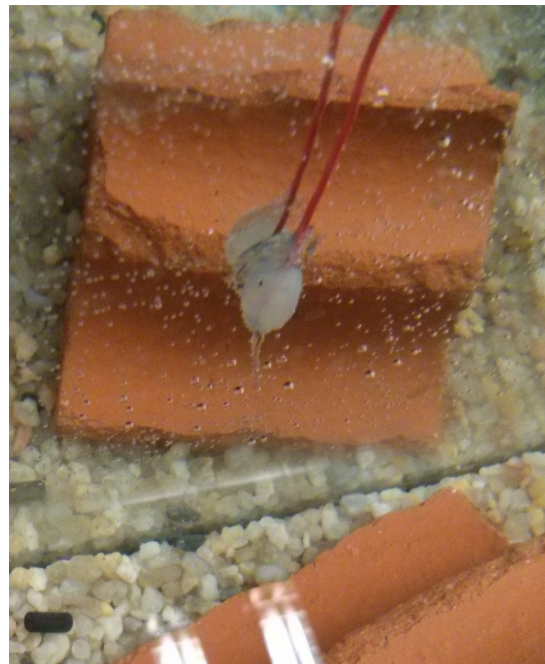


Figura 52: Dipolo fijado sobre la pared del acuario utilizando pegamento termofusible.

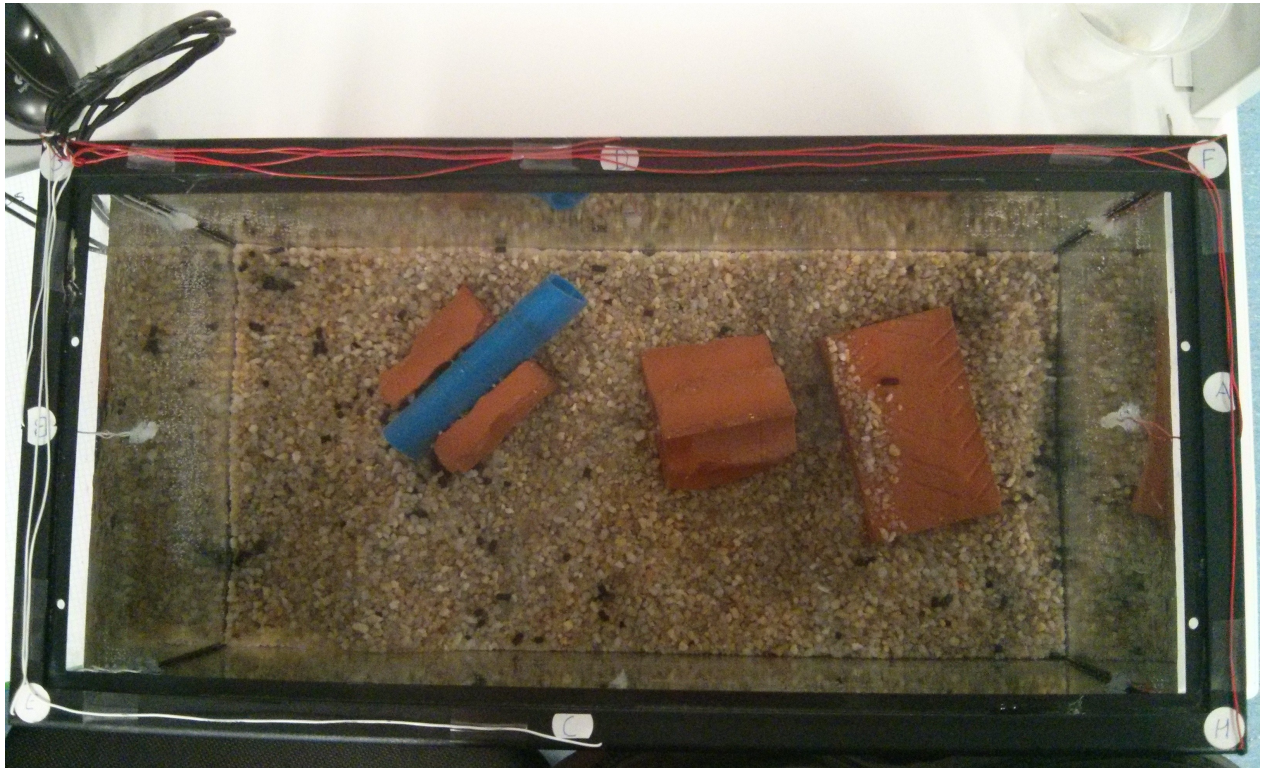


Figura 54: Colocación de los dipolos sobre las paredes interiores del acuario.

E) Lista de componentes eléctricos

Todos los pasos entre pines de los componentes son de 2.54mm y la tecnología es Through-hole.

Las resistencias son de 6mm de longitud.

En caso de duda, consultar los módulos generados para los componentes en el proyecto KiCAD subido a la [Página web del GNB](#).

Módulo apilable

- 2x 100nF condensadores tipo radial
- 4x jumpers de 2 pines
- 1x jumper de 3 pines
- 11x pines sueltos para conectar los jumpers
- 2x Conectores BNC con orientación de 90° y perfil bajo
- 1x Conector vertical de 8 vías con 14.5 mm de largo de pin (Se han utilizado los fabricados por Arduino)
- 1x Conector vertical de 4 vías con 14.5 mm de largo de pin (Se han utilizado los fabricados por Arduino)
- 1x Conector Molex KK 4 vías macho
- 1x Conector Molex KK 4 vías hembra
- 3x terminales de crimpado para carcasa hembra Molex
- 2x resistencia 220 Ohm
- 4x resistencia 2k2 Ohm
- 6x resistencia 91k Ohm
- 4x resistencia 953k Ohm
- 2x Potenciómetros con orientación 90° y pines con distribución triangular.
- 2x Chip DIP TL082
- 2x Zócalos para DIP de 6 pines

Módulo base

- 1x chip AD633
- 1x chip LM741
- 2x Zócalos para DIP de 6 pines
- 2x 100nF condensadores tipo radial

- 2x Diodos 1N4001
- 1x Conector Molex KK 3 vías macho
- 1x Conector Molex KK 3 vías hembra
- 1x Conectores BNC con orientación de 90° y perfil bajo
- 1x Conector vertical de 8 vías con 14.5 mm de largo de pin (Se han utilizado los fabricados por Arduino)
- 1x Conector vertical de 4 vías con 14.5 mm de largo de pin (Se han utilizado los fabricados por Arduino)
- 1x resistencia 10k Ohm
- 1x Potenciómetros con orientación 90° y pines con distribución triangular.